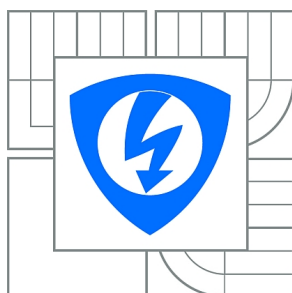




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

IR TEPLOMĚŘ

IR THERMOMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JITKA FRIDRICHOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ROZMAN, CSc.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Studentka: Bc. Jitka Fridrichová

ID: 151300

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

IR teploměr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte metody bezkontaktního měření teploty těles v životním prostředí. 2) Seznamte se s metodami využívajícími IR záření. 3) Zpracujte literární rešerši v dané oblasti. 4) Navrhněte systémové řešení IR teploměru pro rozsah teplot -20 až +50 stupňů Celsia. 5) Na základě systémového návrhu vypracujte obvodové řešení tohoto teploměru s bateriovým napájením a číslicovým displejem. Experimentálně ověřte základní funkční bloky přístroje. Práce musí obsahovat celkové schéma zapojení, výkres plošného spoje a soupisku součástek. 6) Proveďte diskusi návrhu a zhodnoťte jeho výhody a nevýhody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ROZMAN, J., SADOVSKÝ, P., ČERMÁK, D. Diagnostika životního prostředí. VUT FEI, Brno, 2000, ISBN 80-214-1771-4.
[2] RIPKA, P. a kol. Senzory a převodníky. ČVUT, Praha, 2009, ISBN 978-80-01-03123-0.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma IR teploměr jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. 5. 2014

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 23. 5. 2014

.....

Podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na oblast bezkontaktního měření teploty, navrhnutí a sestavení bezkontaktního IR teploměru. Práce se zabývá fyzikálními veličinami a zákony IR záření, metodami a druhy detektorů, které se využívají k bezkontaktnímu měření teploty. V praktické části práce je vytvořen systémový návrh a blokové schéma IR teploměru. Dále je zde uvedeno obvodové řešení, návrh plošného spoje a programové zpracování IR teploměru. V závěru je shrnutí dosažených výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplota, teploměr, bezkontaktní, infračervený

ABSTRACT

These master's thesis deals with the issues of contactless temperature measurement, design and construction of the infrared contactless thermometer. The thesis is concerned with the IR physical magnitudes and laws, methods of measurement and types of detectors, which are used for contactless temperature measurement. In the practical part of the thesis is created system design and block diagram of the IR thermometer. In the next part of the thesis is presented system design, drawing of the printed circuit board and software processing of the IR thermometer. In conclusion are summarized our achieved results.

KEYWORDS

Temperature, thermometer, contactless, infrared

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRIDRICHOVÁ, J. *IR teploměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

OBSAH

OBSAH.....	6
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty.....	9
1.1 Základní poznatky z termodynamiky	10
1.2 Fyzikální veličiny a zákony z oblasti termodynamiky	13
2 METODY MĚŘENÍ TEPLoty	18
2.1 Pyrometrické metody	18
2.2 Detektory infračerveného záření.....	21
3 SYSTÉMOVÝ NÁVRH IR TEPLoměRU	27
3.1 Požadavky na IR teploměr	27
3.2 Volba detektoru.....	28
3.3 Volba pyrometrické metody	33
3.4 Koncepční řešení IR teploměru	34
4 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ IR TEPLoměRU.....	37
4.1 Obvodové prvky a jejich zapojení	38
4.2 Návrh plošného spoje.....	43
4.3 Programové řešení	45
5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	49
5.1 Experimentální ověření funkčnosti IR teploměru.....	49
5.2 Chyby měření a jejich řešení	52
ZÁVĚR	56
LITERAURA.....	57
SEZNAM POŽITÝCH ZKRATEK.....	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření	12
Obrázek 2 : Spektrální hustota intenzity vyzařování AČT	15
Obrázek 3 : Wienův zákon posuvu	16
Obrázek 4 : Závislost zářivosti na φ	17
Obrázek 5 : Termoelektrický detektor	22
Obrázek 6 : Bolometr.....	23
Obrázek 7 : Pyroelektrický detektor	25
Obrázek 8 : Kvantový detektor	26
Obrázek 9 : Spektrální hustota vyzařování AČT	27
Obrázek 10 : Závislost atmosférické propustnosti na vlnové délce.....	28
Obrázek 11: Detektor MLX 90614	29
Obrázek 12 : Blokové schéma MLX 90614	30
Obrázek 13 : Zorné pole modulu MLX 90614	31
Obrázek 14 : Rozložení pinů MLX90614.....	31
Obrázek 15 : Doporučené schematické zapojení MLX90614	32
Obrázek 16 : Přesnost měření detektoru v závislosti na teplotě objektu a okolí	33
Obrázek 17 : Blokové schéma IR teploměru	35
Obrázek 18 : Kapacita baterie Energizer 6LR61	38
Obrázek 20 : Laserový modul LM650-D6	40
Obrázek 19 : Schéma zapojení IR teploměru	39
Obrázek 21 : Displej PC1602-LRU-FWA-B-Q.....	41
Obrázek 22 : Arduino UNO s procesorem ATmega328P	42
Obrázek 23 : Pouzdro ATmega328P	42
Obrázek 24 : Deska plošného spoje IR teploměru.....	44
Obrázek 25 : Osazení součástek IR teploměru	44
Obrázek 26 : Schéma programového řešení	46
Obrázek 27 : IR teploměr Volcraft IR-900-30S	50
Obrázek 28 : Graf závislosti teploty na vzdálenosti - topení.....	51
Obrázek 29 : Graf závislosti teploty na vzdálenosti - mrazák	51
Obrázek 30 : LED dioda s chladičem	53
Obrázek 31: Vztah mezi velikostí plochy měřeného objektu a velikostí zorného pole..	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : Parametry detektoru MLX90614.....	32
Tabulka 2 : Energetická náročnost použitých součástek	37
Tabulka 3: Parametry laserového modulu LM650-D	40
Tabulka 4 : Piny displeje	41
Tabulka 5 : Soupiska součástek IR teploměru.....	43
Tabulka 6 : Naměřené hodnoty teplot v závislosti na vzdálenosti měření	50
Tabulka 7 : Tabulka emisivit různých materiálů	55

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLOTY

První úspěšný pokus o sestrojení přístroje na měření teploty byl zaznamenán až v 17. stol. Tento teploměr sestrojil slavný vědec Galileo Galilei. Jednalo se však pouze o primitivní model, který byl v té době označován jako termoskop. Během staletí až do dnešní doby bylo sestrojeno mnoho různých druhů teploměru a věda v tomto odvětví ušla opravdu dlouhou cestu. Potřeba sestrojít zařízení, které bude schopno měřit teplotu, vycházela nejprve z potřeby běžného života člověka, avšak potřeba měření teploty se rozšířila i do dalších oblastí činnosti člověka, jako je například průmysl, laboratorní pokusy atd. S rostoucím spektrem využití rostla také potřeba přesnějšího měření. V dnešní době je na trhu nepřehledné množství druhů teploměrů, které se liší metodou měření teploty, rozsahem měřených teplot a účelem, [28].

Během vývoje konstrukce teploměrů došlo také k rozdělení teploměrů do dvou základních skupin:

- teploměry pro kontaktní měření teplot
- teploměry pro bezkontaktní měření teplot.

Právě teploměrům pro bezdotykové měření teplot je věnována tato diplomová práce.

První část diplomové práce pojednává o metodách, detektorech a jejich aplikaci při bezkontaktním měření teploty. Práce je rozdělena dle logického uspořádání do několika kapitol. V prvních kapitolách jsou popsány fyzikální vlastnosti a zákonitosti, které jsou spojeny s infračerveným (dále jen IR) zářením. Poté jsou uvedeny také druhy detektorů a pyrometrické metody. Na tyto kapitoly navazuje praktické zpracování zadání diplomové práce, které pojednává o samotném systémovém návrhu IR teploměru a jeho blokovém schématu, zde je názorně zobrazena stavba navrhnutého IR teploměru. V části systémový návrh byla zvolena také základní stavební součástka, kterou je vhodný detektor.

V dalším kroku je práce věnována bateriovému napájení, schematickému zapojení celého IR teploměru a vytvoření návrhu desky plošného spoje. V práci je také uvedeno programové zpracování procesu výpočtu teploty objektu a také zobrazení vypočtených hodnot na displeji.

V závěru je provedeno zhodnocení dosažených výsledků a posouzení, zda vytvořená práce splňuje všechny podmínky, které jsou nutné pro splnění zadání diplomové práce.

Nejprve je nutno podotknout, že právě teploměry pro bezkontaktní měření mají velkou využitelnost a v některých případech jsou zcela nenahraditelné. Škála využití těchto teploměrů je opravdu obrovská, proto uvedeme pouze nejdůležitější případy:

- v průmyslu jsou využity k měření vysokých teplot v hutnictví, sklářství a v dalších odvětvích
- v ekologii našly uplatnění při měření tepelné izolace budov
- v medicíně mohou být využívány například termovizní systémy, které jsou využívány k detekci a zobrazení oblastí, kde je vyšší tělesná teplota (např. nádor nebo zánět), kromě termovizních systémů lze využít také bezkontaktní teploměry pro měření tělesné teploty
- těchto teploměrů může být využito také jako součást bezpečnostních systémů budov, kdy jsou využity jako čidla pohybu.

S užitím teploměrů pro bezkontaktní měření teplot je spojena celá řada výhod i nevýhod. Mezi důležité výhody těchto teploměrů patří jejich schopnost zaznamenat i teplotu těles, jejichž teplota se v čase rychle mění. Překážkou pro tyto teploměry nejsou ani pohybující se tělesa. V neposlední řadě je nutné zmínit, že teploměry během měření nijak neovlivňují měřený objekt, nehrozí tedy riziko jejich znečištění nebo mechanického poškození. Je však nutno také zmínit nevýhody, které jsou s těmito teploměry spojeny. Nejdůležitější podmínkou je, že měřený objekt musí být pro teploměr přímo viditelný, jakákoliv překážka, i sebemenších rozměrů, znemožňuje změření teploty tohoto objektu. Nesmíme proto zapomínat, že naměřené hodnoty teploty mohou být proto značně ovlivněny v prašném prostředí, nebo v prostředí s velkou vlhkostí vzduchu. Při měření je také nutno pamatovat na to, že naměřená hodnota odpovídá pouze teplotě povrchu tělesa a nijak nevypovídá o jeho vnitřní teplotě, [24].

1.1 Základní poznatky z termodynamiky

Teplota je stavová veličina, která hraje důležitou roli v mnoha fyzikálních zákonech. Teplota nám udává, s jakou mírou kinetické energie se pohybují molekuly a atomy, při tom dochází ke srážkám molekul a tak ke změně rychlosti jejich pohybu v čase. Pohyb molekul se značně liší u jednotlivých látkových skupenství. Neuspořádaný pohyb kolem rovnovážné polohy je charakteristickým znakem pevného skupenství látek, zatímco u kapalného a plynného skupenství se molekuly pohybují neuspořádaně v celém svém objemu. Jelikož teplotu nelze měřit přímo, tak k jejímu stanovení se využívá jiných fyzikálních veličin, které jsou teplotně závislé, a tuto závislost můžeme následně matematicky vyjádřit teplotní stupnicí. Tento druh měření

se označuje jako tzv. nepřímé měření. Častou chybou je, že dochází k záměně fyzikálních veličin teploty a tepla. Teplo, na rozdíl od teploty, není stavovou veličinou, ale je jistou formou energie, která souvisí s pohybem částic soustavy, [14].

Rozlišujeme tři teplotní stupnice: [14]

- termodynamická
- Celsiova
- Fahrenheitova.

K sestrojení termodynamické teplotní stupnice posloužila účinnost vratných cyklů dle Carnotovy věty. Carnotova věta říká, že účinnost vratných cyklů, které pracují mezi teplotami T a T_0 není závislá na druhu pracovní látky. Platí tedy

$$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T}, \quad (1)$$

z čehož plyne vztah:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{T}{T_0}. \quad (2)$$

Měření poměru teplot lze převést na kalorimetrické měření poměru tepel, [16]. Počátek této stupnice je termodynamická absolutní nula. Základní jednotku představuje kelvin ($^{\circ}\text{K}$), [2]. Kelvin byl stanoven na základě rovnovážného stavu všech tří skupenství vody (tzv. trojný bod vody). Teplota trojného bodu vody byla stanovena na $273,16^{\circ}\text{K}$, [21].

Z termodynamické stupnice byla odvozena Celsiova teplotní stupnice, jejíž základní jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Celsiova teplota je rovna

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}. \quad (3)$$

V některých zemích světa se využívá také Fahrenheitova stupnice (např. USA), pro kterou platí vztah:

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32, [14]. \quad (4)$$

Mezi hmotou všeho druhu a okolním prostředím dochází neustále k výměně tepelné energie formou elektromagnetického záření. Toto záření je tvořeno nespojitým monochromatickým vlněním, jehož distribuce se liší u jednotlivých vlnových délek. Elektromagnetické spektrum představuje rozsah sledovaných vlnových délek, [16].

Senzory teploty jsou funkční součástí vstupního bloku měřicího přístroje. K pojmu senzor teploty jsou ekvivalentní také pojmy detektor teploty, snímač teploty, čidlo teploty nebo teploměr. Senzory teploty můžeme dělit dle několika kritérií:

- dle fyzikálního principu
- dle styku s měřeným prostředím
- dle transformace signálu.

Dle fyzikálního principu se dělí senzory na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické, [14].

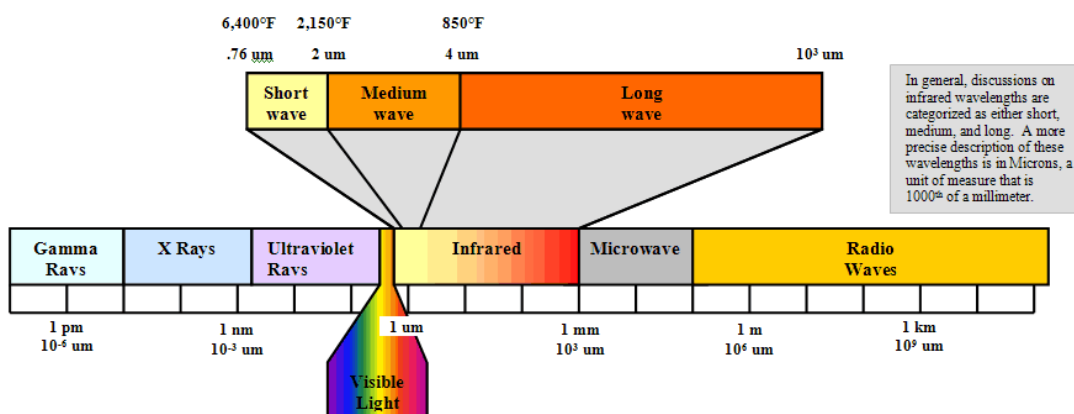
Dle styku s měřeným prostředím můžeme senzory rozdělit na senzory pro bezdotykové a dotykové měření.

Dle transformace signálu rozlišujeme senzory na aktivní a pasivní. Aktivní senzory jsou působením teploty zdrojem elektrické energie. Naopak u pasivních senzorů je nutné je elektricky napájet, aby byly schopny transformace teploty na jinou fyzikální veličinu. Jedinou výjimkou u pasivních senzorů jsou chemické indikátory, které není nutné napájet, [14].

Dále se práce bude zabývat pouze bezkontaktním měření teploty, z toho důvodu dojde k vynechání popisu metod kontaktního měření teploty.

Nejprve je nutno si říci, co je to IR záření. Infračervené záření je tvořeno fotony elektromagnetického záření, jejichž vlnová délka je 0,75 μm – 1 mm. IR záření se vyznačuje malou energií a neschopností ionizace. Samotné IR záření lze dále rozdělit podle jejich vlnových délek na:

- blízkou oblast – 750 – 1300 nm
- střední oblast – 1300 – 4000 nm
- daleká oblast – 4000 – 15000 nm



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření, [19].

Vyzařování IR záření lze zaznamenat u veškeré hmoty, jejíž teplota je větší než absolutní nula (0 °K). Vyzařuje-li těleso IR záření, pak tak činí na úkor své vlastní energie, kterou tím ztrácí. Spektrum, velikost a směr šíření zářivého toku jsou závislé na vlastnostech zdroje. Samotná planeta Země se chová jako zářič, neboť neustále vyzařuje IR záření. Rozdílné spektrum mají plyny, kapaliny a pevné látky. U kapalin a pevných látek je spektrum spojitě, naopak u plynů je spektrum čárové. Každý plyn lze díky jeho odlišným spektrálním čarám přesně identifikovat, [4].

Dále je nutno znát několik fyzikálních veličin a zákonů, které jsou spojeny s IR zářením.

1.2 Fyzikální veličiny a zákony z oblasti termodynamiky

Fyzikální veličiny

Zářivý tok (Φ_e)

Zářivý tok je definován jako energie, kterou vyzáří zdroj za jednotku času.

$$\Phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad [\Phi_e] = J \cdot s^{-1} = W, \quad (5)$$

kde ΔE je energie vyzářena ze zdroje za dobu Δt , [14].

Zářivý tok je u ideálního bodového zdroje vyzařován do všech směrů rovnoměrně. To však neplatí u reálných nebodových zdrojů záření. Z toho důvodu byla zavedena veličina zářivost, [18].

Zářivost (I_e)

Veličina zářivost slouží k určení množství energie, které bylo vyzářeno do určité části prostoru. Zářivost je definována jako podíl zářivého toku a velikostí prostorového úhlu.

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Delta \Omega} \quad [I_e] = W \cdot sr^{-1}, \quad (6)$$

kde $\Delta \Omega$ je prostorový úhel, [20].

Intenzita vyzařování (M_e)

Intenzita vyzařování představuje podíl zářivého toku, který je vyzářen z plochy zdroje a plochy tohoto zdroje.

$$M_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S} \quad [M_e] = W \cdot m^{-2}, \quad (7)$$

kde ΔS je obsah vyzařované plochy, [20].

Zář (L_e)

Zář je v určitém bodě plošného zdroje a v určitém směru definována jako diferenciální podíl zářivosti tohoto plošného zdroje o obsahu S v daném směru a průmětu této plochy do roviny kolmé k tomuto směru.

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha} \quad [L_e] = W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}, \quad (8)$$

kde úhel α je úhel mezi normálou plošky a daným směrem, [26].

Intenzita ozáření (E_e)

Intenzita ozáření je dána podílem zářivého toku, který dopadá na plochu povrchu tělesa o obsahu ΔS .

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S} \quad [E_e] = W \cdot m^{-2}, [20]. \quad (9)$$

Fyzikální zákony

Všechny fyzikální zákony popisující vlastnosti záření jsou vztaženy k absolutně černému tělesu (AČT), též označováno jako černý zářič. Černé těleso je těleso, které dokonale pohlcuje veškeré dopadající záření bez ohledu na jeho vlnovou délku a úhel, pod kterým dopadá na povrch černého tělesa. Zároveň černé těleso je také ideálním zářičem, neboť vyzařuje maximální energii při každé vlnové délce. Jeho emisivita je rovna $\varepsilon = 1$. Záření absolutně černého tělesa se blíží záření Slunce, [14].

Planckův vyzařovací zákon

Tento zákon nám udává, jaké je spektrální rozložení teplotního záření. Pro AČT je jeho tvar:

$$H_{e\lambda 0} = H_0(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{c_2}{T \cdot \lambda}} - 1\right)} \quad [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}] [W \cdot m^{-3}] \quad (10)$$

$H_{e\lambda 0}$ spektrální hustota intenzity vyzařování AČT

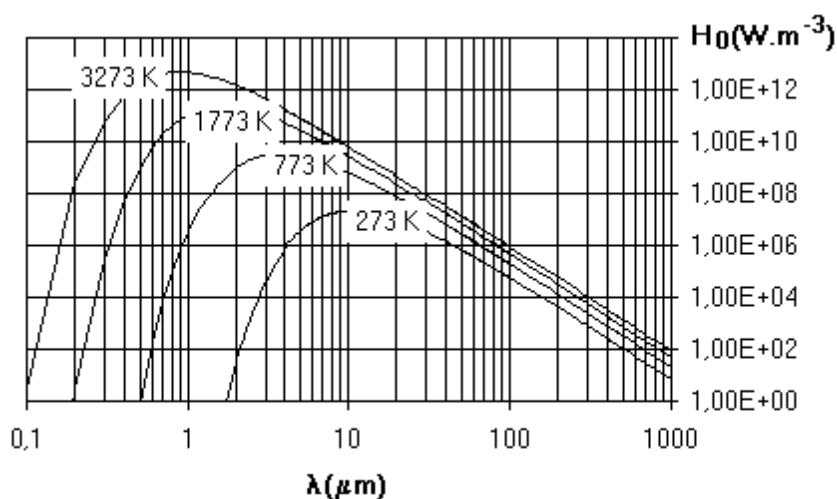
c_1 první vyzařovací konstanta

c_2 druhá vyzařovací konstanta

λ vlnová délka záření

T termodynamická teplota AČT, [16].

Na Obrázku 2 je zobrazena závislost $H_{e\lambda 0} = H_0(T, \lambda)$.



Obrázek 2 : Spektrální hustota intenzity vyzařování AČT, [27]

Wienův posunovací zákon

Wienův posunovací zákon nám udává závislost vlnové délky maxima na termodynamické teplotě T .

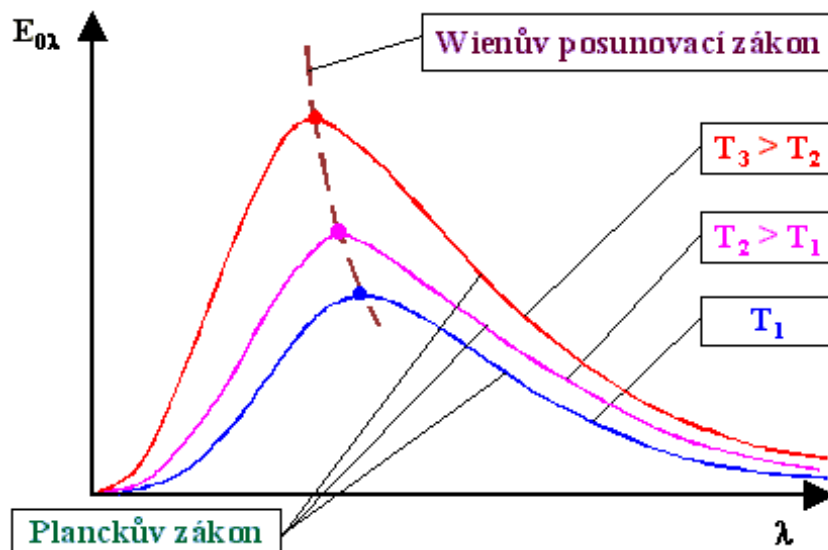
$$T \cdot \lambda_{max} = b [m \cdot K] \quad (11)$$

T termodynamická teplota

λ_{max} maximální vlnová délka záření

b Wienova konstanta (také označována jako třetí vyzařovací konstanta)

Z tohoto vztahu plyne, že se maximální vyzařovaná energie AČT na dané vlnové délce s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje, [16]. Tento jev je jasně patrný na Obrázku 3.



Obrázek 3 : Wienův zákon posuvu, [31]

Stefan – Boltzmannův zákon

Stefan – Boltzmannův zákon popisuje celkovou intenzitu vyzařování AČT v celém rozsahu vlnových délek při termodynamické teplotě T .

$$H_0(T) = \sigma \cdot T^4 [W] \quad (12)$$

T termodynamická teplota

σ Stefan – Boltzmannova konstanta

Ze vztahu plyne, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty vyzařujícího tělesa, [16].

Lambertův zákon

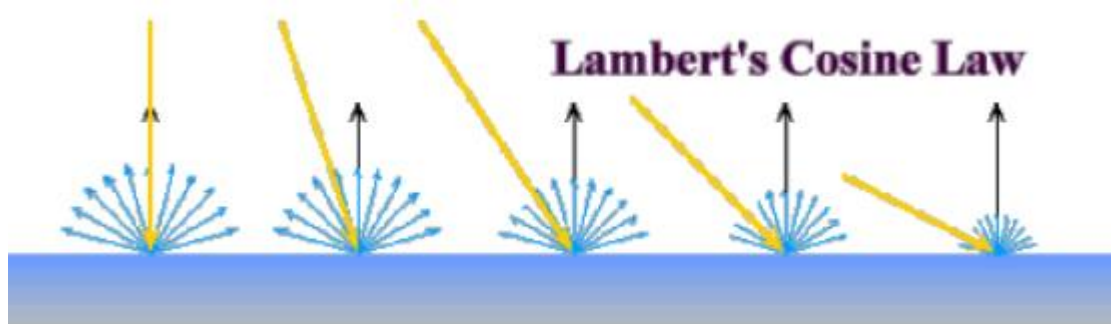
Lambertův zákon říká, že zář L ideálního plošného zdroje záření je konstantní ve všech směrech od tohoto zdroje. Naopak zářivost I klesá s cosinem odklonu od kolmice vedené z plošného zdroje.

Tento zákon je vyjádřen vztahem:

$$L_{\varphi} = konst. \quad (13)$$

$$I_{\varphi} = I_n \cos \varphi \quad (14)$$

I_n maximální hodnota zářivosti ve směru kolmice, [14].



Obrázek 4 : Závislost zářivosti na φ , [25]

Kirchhoffův zákon

Tento zákon udává vztah mezi vyzařováním černých a nečerných zářičů, [16]. Zákon vyjadřuje, že poměr intenzity vyzařování zářiče a pohltivosti je závislý pouze na termodynamické teplotě daného tělesa a není nijak ovlivněn jeho chemickým složením, oxidací nebo povrchovou úpravou, [14].

Zákon lze zapsat ve tvaru:

$$\frac{H(T, \lambda)}{\alpha(T, \lambda)} = f(T, \lambda). \quad (15)$$

Z tohoto vztahu plyne, že čím více těleso pohlcuje záření, tím také více vyzařuje, což platí při všech vlnových délkách. Jak již bylo uvedeno výše, nejvíce vyzařuje právě AČT, jehož $\alpha_0(T, \lambda) = 1$. Je tedy zcela jasné, že tělesa vyzařují nejvíce záření dané vlnové délky, kterou nejvíce pohlcují, [16].

2 METODY MĚŘENÍ TEPLOTY

2.1 Pyrometrické metody

2.1.1 Širokopásmová pyrometrie

Tato metoda bývá označována také jako úhrnná pyrometrie. Jedná se o metodu, která využívá k vyhodnocení měřené teploty Stefan-Boltzmannův zákon a detektory pracují tedy v celém spektru vlnových délek. Z toho plyne, že lze používat pouze tepelné senzory, neboť kvantové senzory jsou spektrálně omezené. K zaostření světelného toku na detektor slouží soustava čoček nebo zrcadla. Avšak použité čočky musí být vyrobeny z takového materiálu, který má široké spektrum propustnosti. To je však v praxi omezeno z důvodu odrazivosti zrcadla a pohltivosti citlivé vrstvy senzoru. V praxi byl zaveden pojem černá teplota T_0 , což je teplota černého zářiče, při níž tento zářič vyzařuje se stejnou intenzitou jako měřený předmět T_s . Platí tedy vztah:

$$\sigma T_0^4 = \varepsilon \tau_p \sigma T_s^4, \quad (16)$$

z něž lze odvodit vztah pro teplotu T_s , jenž je:

$$T_s = T_0 \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon \tau_p}}. \quad (17)$$

ε je emisivita tělesa, jehož teplotu měříme

τ_p je propustnost prostředí, [14, 21].

2.1.2 Jednopásmová pyrometrie

Pro tuto metodu je typické, že měření probíhá pouze v úzkém pásmu vlnových délek. Šířka tohoto pásma vlnových délek se pohybuje od 10 nm do jednotek několika μm . Šíře pásma vlnových délek je ovlivněna spektrální citlivostí kvantového detektoru, spektrální odrazivostí zrcadel, spektrální propustností optiky a optických filtrů

a spektrální propustností prostředí. Toto platí jak pro detektory kvantové, tak i pro detektory tepelné. Pro zář, která dopadá na detektor, platí vztah:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \psi_\lambda L_{0\lambda} d\lambda, \quad (18)$$

kde ψ_λ je přístrojová funkce, která je dána spektrální citlivostí detektoru, [13, 21].

V praxi se zavádí efektivní vlnová délka λ_{ef} a efektivní hodnota emisivity ε_{ef} . To nám zajišťuje, že všechny výpočty se provádí právě jen s jednou hodnotou záře a emisivity. Přínosem pro zavedení těchto efektivních hodnot je to, že lze provést teoretické výpočty pro monochromatické záření. Monochromatické záření je takové záření, jehož zdroj kmitá pouze na jedné frekvenci f . V praxi to však není možné a monochromatické pyrometry jsou pouze teoretickou záležitostí, ve skutečnosti se vždy jedná o pásmové pyrometry. Je-li však pásmo vlnových délek široké, je možné při výpočtech využít Stefan-Boltzmannův zákon. Vezmeme-li u monochromatických pyrometrů teplotu černého zářiče T_0 , při níž má zářič stejnou spektrální hustotu záře jako měřený předmět T_s , platí tedy vztah:

$$\frac{1}{\Omega_0 \pi} c_1 \lambda^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T_0}} = \frac{\varepsilon_\lambda \tau_{\lambda p}}{\Omega_0 \pi} c_1 \lambda^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T}}, \quad (19)$$

z této rovnice již lze odvodit teplotu měřeného tělesa, která je rovna:

$$T_s = \frac{T_0 c_2}{c_2 + \lambda T_0 \ln(\varepsilon_\lambda \tau_{\lambda p})}. \quad (20)$$

Oba vzorce počítají s určitou chybou pro efektivní hodnotu emisivity. Ve srovnání s širokopásmovými pyrometry je zde chyba dána nejistotou emisivity podstatně větší, [13, 21].

Výstupní signál jednopásmového pyrometru je roven:

$$u(T) = K \varepsilon_{ef} L_{\lambda_{ef}}, \quad (21)$$

K je konstanta pyrometru, která bere v potaz citlivost detektoru a zároveň i parametry optiky.

V tomto vztahu však počítáme s tím, že propustnost optiky je rovna jedné a zároveň zanedbáváme zpětnou zář z pouzdra detektoru a také vliv odraženého záření z okolí, [21].

2.1.3 Dvoupásmová pyrometrie

U dvoupásmové pyrometrie dochází k vyhodnocení teploty objektu na základě poměru dvou zářích při dvou různých vlnových délkách, z toho důvodu je označována také jako poměrová pyrometrie. Kalibrace pyrometrů probíhá při teplotě spektrálního složení, tj. teplota černého tělesa T_0 , při níž je poměr zářích dvou vlnových délek λ_1 λ_2 roven poměru zářích u měřeného objektu, který má teplotu T_s . Má-li křivka spektrální hustoty záře stejný tvar u AČT a měřeného objektu a pokud používáme vlnových délek viditelného spektra záření, pak se teplota spektrálního složení nazývá teplotou barvy. Využitím Planckova vyzařovacího zákona můžeme dokázat, že poměr zářích je naprosto jednoznačný, avšak pro každou teplotu odlišný. Platí proto vztah pro teplotu spektrálního složení T_p :

$$\frac{L_{\lambda 1}}{L_{\lambda 2}} = \frac{\frac{1}{\Omega_0 \pi} \frac{c_1}{\lambda_1^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T_p}}}}{\frac{1}{\Omega_0 \pi} \frac{c_1}{\lambda_2^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T_p}}}} = \frac{\varepsilon_{\lambda 1} c_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T_s}}}{\varepsilon_{\lambda 2} c_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T_s}}}. \quad (22)$$

Dále z tohoto vztahu byla odvozena rovnice:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} - \frac{1}{c_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}}. \quad (23)$$

Z daného vztahu je patrné, že měřicí princip pyrometru bude nezávislý na hodnotě emisivity měřeného povrchu pouze v případě, že platí rovnost

$$\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}. \quad (24)$$

Jako v případě jednopásmových pyrometrů je i zde zavedena efektivní hodnota emisivity a efektivní hodnoty vlnových délek, [21].

2.1.4 Termovizní systémy

Termovizní systémy jsou systémy, které se používají pro bezdotykové měření teplotních polí.

Tyto systémy je možno rozdělit na systémy:

- bez rozkladu obrazu
- s rozkladem obrazu.

U starších systémů se využívá technik bez rozkladu obrazu, kdy dochází k vytvoření tepelného obrazu optikou na fotokatodě. Při ozáření fotokatydy dojde k emisi elektronů, následně fotonásobič zesílí jejich tok. Poté elektrony dopadají na luminiscenční stínítko, které zajišťuje vznik viditelného obrazu. U těchto systémů je však omezení do vlnových délek 1 μm . Oproti tomu systémy, u nichž dochází k rozkladu obrazu, pracují na elektronickém nebo opticko-mechanickém principu. Avšak i u moderních systémů se dostalo uplatnění technik pracujících bez rozkladu obrazu. Využívá se takových systémů, kdy je v ohnisku optiky vložena chlazená plošná matice FPA (Focal-Plane-Array), která se skládá z 256 x 256 detektorů. Tyto detektory bývají nejčastěji vyrobeny z InSb nebo PtSi. Využití u dalších typů termovizních systémů má také matice nechlazených bolometrů, [21].

U termovizních systémů se používají dvě hlavní pásma vlnových délek:

- krátkovlnné pásmo (2 μm – 5 μm)
- dlouhovlnné pásmo (7 μm – 13 μm).

Lze také využít u těchto systémů amplitudový diskriminátor videosignálu, díky němuž můžeme u termovize nastavit barvu pro libovolné rozmezí teplot, popř. vybereme některou z nabízených barevných palet. Velkého uplatnění termovizních systémů došlo v oblasti medicíny u infračervené diagnostiky, nebo je také značně rozšířena v průmyslu, kdy tyto systémy slouží k diagnostice teplotního pole objektů, u nichž se předpokládá změna rozložení povrchové teploty. Tato změna může nastat, například při opotřebení materiálu způsobené třením, u materiálových vad a jiných defektů, [14].

2.2 Detektory infračerveného záření

Detektory tepelného záření lze rozdělit na základě interakce fotonů záření s materiálem detektoru do dvou základních skupin: [14]

- tepelné
- kvantové.

2.2.1 Tepelné detektory

Základním znakem tepelných detektorů je to, že vstupní dopadající záření je pohlcováno aktivní plochou detektoru. Tím pádem dochází ke zvyšování teploty detektoru. U těchto detektorů hraje spektrální rozdělení zanedbatelnou roli, proto lze

řící, že výstupní signál tepelných detektorů je nezávislý na vlnové délce dopadajícího záření a lze jej považovat za neselektivní. Tepelné detektory mají relativně velkou citlivost, která je dána širokým absorbovaným spektrem a také velkým poměrem signál – šum, [16].

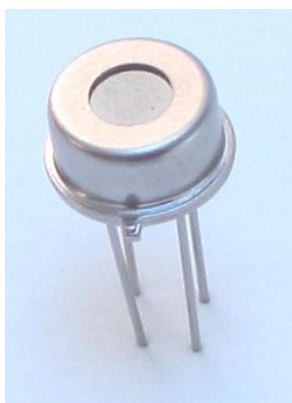
Tepelné detektory lze dále dělit do tří skupin: [14]

- termoelektrické
- bolometrické
- pyroelektrické.

Termoelektrické detektory

Termoelektrické detektory neboli termoelektrické baterie, termočlánky jsou sériově řazené termoelektrické články. Jsou sestaveny jako tenké kovové pásky nebo jako pásky zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií, [14]. Tyto detektory vychází z tzv. Seebeckova jevu, tedy jevu, kdy převádíme tepelnou energii na energii elektrickou. Víme, že ve vodičích, jejichž teplota není konstantní, vzniká termoelektrické napětí. Berme v úvahu vodič, jímž neprochází žádný proud I . Potom tedy napětí U_{AB} mezi konci vodiče, je závislé jen na rozdílu teploty těchto konců. Toto napětí nelze bohužel měřit, proto využíváme dvou drátů, které se liší Seebeckovými koeficienty, tím pádem získáme na jejich rozpojených koncích napětí U_{BC} . Udržíme-li na konci BC neměnnou teplotu, pak lze díky dvojici těchto drátů měřit teplotu spoje A. Ve světě došlo k normalizaci typů termočlánků, kdy jednotlivé druhy získaly označení dle doporučení IEC velkými písmeny, [21].

Ozařovaný spoj detektorů je začerněn, abychom dosáhli větší absorpce vstupního záření. Účelem zapouzdření termoelektrických detektorů je zvýšení jejich stability. Na trhu je nepřeberné množství různých tvarů detektorů, [16]. Na Obrázku 5 je příklad termoelektrického detektoru.



Obrázek 5 : Termoelektrický detektor, [18]

Bolometrické detektory

Činnost bolometrických detektorů (bolometrů) vychází ze změny elektrického odporu, ten nastává v důsledku ohřevu odporového elementu absorbovaným zářením, [16].

Odporové elementy mohou být různého druhu: [16]

- kovové
- dielektrické
- polovodičové
- supravodivé.

Nejčastěji jsou používány tenkovrstvé mikrobolometrické senzory z kysličníků (MgO, MnO, NiO atd.), které jsou nanесeny na velmi tenké nevodivé podložce, ta je přilepena na masivní kovový blok, [21]. Tyto mikrobolometrické senzory mohou být uspořádány jako plošné detektory nebo jako řádkové. Plošných detektorů se užívá při konstrukci termovizních kamer [14]. Výstupní napětí bolometru je rovno:

$$U(t) = S_u \cdot \phi(t). \quad (25)$$

S_u napěťová citlivost

$\phi(t)$ vstupní zářivý tok

Z toho tedy plyne, že výstupní napětí bolometru, je přímo úměrné vstupnímu zářivému toku. Abychom zajistili to, že změna teploty bolometru bude přímo úměrná pouze absorbovanému IR záření, je nutno bolometry dokonale tepelně izolovat od okolí, [16].

Na Obrázku 6 je znázorněn příklad bolometru.



Obrázek 6 : Bolometr, [30]

Pyroelektrické detektory

Pyroelektrické detektory využívají tzv. pyroelektrického jevu, kdy dochází ke spontánní změně polarizace P_s při změně teploty. Tato změna polarizace způsobuje generaci elektrického náboje, [21]. V praxi bývají využívány tyto materiály – TGS, PZT, PVDF, LiTaO_3 , BaTiO_2 , PbTiO_3 . Základním parametrem všech pyroelektrických detektorů je pyroelektrický koeficient, který lze vyjádřit vztahem:

$$p = \left(\frac{\delta P_s}{\delta T} \right). \quad (26)$$

Pyroelektrický koeficient nabývá hodnot v rozmezí $0,4 - 4,2 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Pyroelektrický senzor je tvořen dvěma elektrodami, na nichž se při změně polarizace naindukuje elektrický náboj. Náboj naindukovaný na elektrodách se vybíjí přes odpor R . U pyroelektrických senzorů dochází také k parazitnímu piezoelektrickému jevu, který způsobuje chybu měření. Piezoelektrický jev se vyskytuje při deformaci pyroelektrika, ta může být způsobena například otřesy. Abychom zabránili chybě v měření, bývá k detektoru připojen opačně pólovaný detektor, který kompenzuje první pyrosenzor. Tento opačně pólovaný pyrodetektor má odstíněnou detekční plošku, která je pokryta vrstvičkou zlata, [14, 21].

Pro výstupní napětí na pyroelektrickém senzoru platí vztah:

$$U = p_T \cdot \frac{\alpha \cdot \phi}{c \cdot \rho \cdot d} \cdot R \quad (27)$$

p_T	pyroelektrický koeficient
ϕ	absorbovaný zářivý tok
R	zátěžový odpor
c	měrná tepelná kapacita
ρ	hustota pyroelektrika
d	tloušťka pyroelektrika

Z toho jasně plyne, že výstupní napětí je přímo úměrné pyroelektrickému koeficientu, zátěžovému odporu a absorbovanému zářivému toku. Výstupní napětí je naopak nepřímo úměrné měrné tepelné kapacitě, hustotě pyroelektrika a jeho tloušťce. Proto je snaha navrhovat pyroelektrické detektory co nejtenčí, [16].

Nevýhodou pyroelektrických detektorů je jejich velká citlivost na mechanické rázy, tzv. mikrofotoničnost. Naopak jejich výhodou je, že není třeba jejich chlazení.

Ve velké míře jsou pyrodetektory užívány i komerčně jako detektory vzniku požáru, detektory kouře nebo detektory pohybu atd., [16].

Na Obrázku 7 je znázorněn příklad pyrodetektoru.



Obrázek 7 : Pyroelektrický detektor, [17]

2.2.2 Kvantové detektory

U kvantových detektorů je využito fyzikálního jevu, který nastává při přímé interakci dopadajících fotonů záření, přičemž vznikají páry elektron – díra. Kvantové detektory jsou polovodičové detektory, v nichž je tepelný pohyb elektronů a děr zcela náhodný, [14].

Kvantové detektory je možno rozdělit na :

- **Intrinsické** – jsou vyrobeny z čistého polovodiče. U těchto detektorů je využito změny pohyblivosti nosičů nábojů, která nastává v okamžiku, kdy na polovodičovou vrstvu dopadají fotony záření. Tyto detektory vyžadují elektrické pole, které způsobí unášení nosičů náboje a následkem bude, že vnějším obvodem bude protékat elektrický proud, [14].
- **Extrinsické** – u těchto detektorů je využito PN přechodu, kdy se nosiče náboje snaží pomocí difúze děr z P do N a elektronů z N do P dosáhnout termodynamické rovnováhy. Ve výsledku je na PN přechodu vytvořena elektrická dvojvrstva nábojů, kterou označujeme jako oblast prostorového náboje (OPN). V této oblasti se nenachází žádné volné nosiče v rovnovážném stavu. Dojde-li k absorpci záření v OPN oblasti, pak dojde k rozdělení párů elektron – díra, kdy jsou díry unášeny do oblasti P a elektrony naopak do oblasti N, [14].

Detektory lze rozdělit také podle toho, v jakém módu pracují. Dělí se tedy na:

- Fotovodivostní – v tomto módu se fotodioda chová jako pasivní prvek, kdy s rostoucí intenzitou záření klesá její odpor, tzn. že její vodivost roste, [14].
- Fotovoltaické – mají oproti fotovodivostním detektorům menší citlivost a menší odstup signálu od šumu. Výhodou těchto detektorů oproti fotovodivostním je to, že není nutné chladit, [14].

Na Obrázku 8 je pro ukázkou znázorněn kvantový detektor.

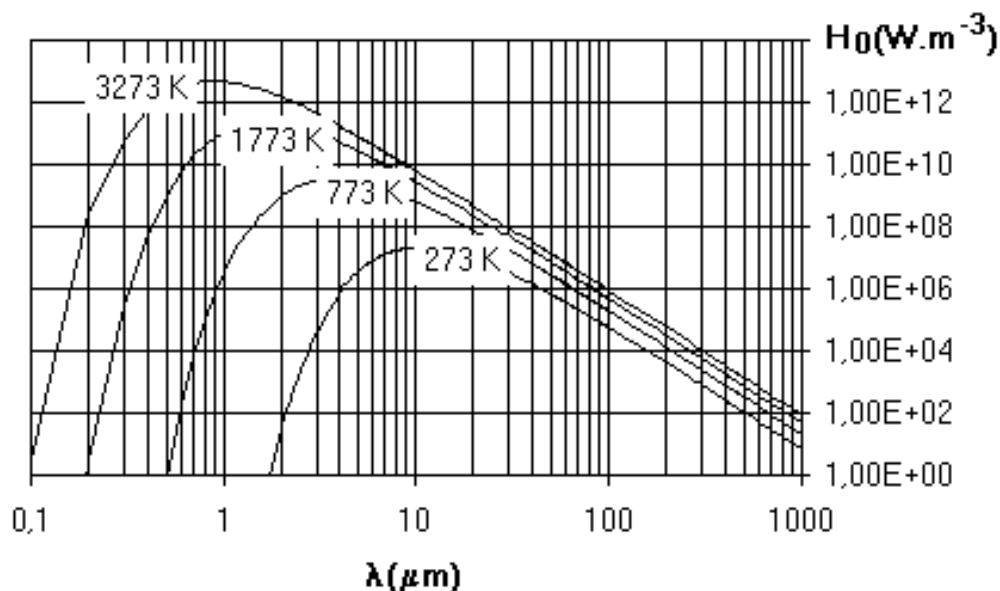


Obrázek 8 : Kvantový detektor, [2]

3 SYSTÉMOVÝ NÁVRH IR TEPLoměRU

3.1 Požadavky na IR teploměr

Tepelný senzor je nejdůležitější stavební jednotkou celého IR teploměru. Dle zadání diplomové práce je požadavek, aby teploměr pracoval v rozmezí teplot -20 až $+50$ °C, což je v přepočtu $253,15$ °K až $323,15$ °K. Graf spektrální hustoty vyzařování na Obrázku 9 nám poslouží k odhadu vlnových délek, s kterými detektor bude pracovat.

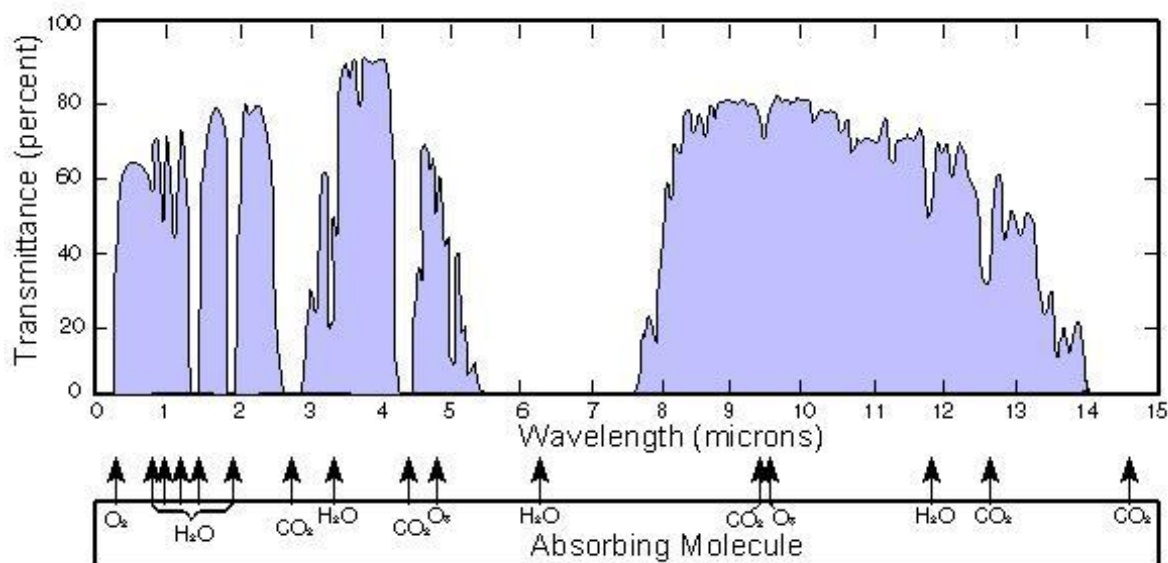


Obrázek 9 : Spektrální hustota vyzařování AČT, [24]

Z Obrázku 9 je jasné patrné, že vyzařovací maximum je přibližně $9-11\text{ }\mu\text{m}$. Právě v této oblasti vlnových délek by měl detektor dosahovat největší citlivosti. Dalším důležitým kritériem pro volbu detektoru je také vzdálenost objektu, jehož teplotu chceme měřit. Čím jsou teploměr a objekt blíže, tím dosahujeme samozřejmě větší přesnosti měření. Aby i na vzdálenost docházelo k dobrým výsledkům měření, jsou teploměry opatřeny speciálními čočkami, které nám zajistí možnost měření i na větší vzdálenosti. Samotná čočka přímo zajišťuje fokusaci zářivého toku na detektor. Kromě fokusace může čočka ovlivnit i rozsah měřených teplot, neboť je vyráběna z různých materiálů. V současnosti jsou nejrozšířenější čočky na bázi Ge a Si. Kromě čoček se využívají u detektorů také clony, které zajišťují, aby nebyl detektor ozářen i z jiných zdrojů, [24].

Nejen vzdálenost měřeného objektu od detektoru je důležitým kritériem, ale velkou roli může hrát také čistota prostředí, neboť na prachových částicích nebo kapkách vody dochází k rozptylu IR záření, což znehodnocuje námi naměřený výsledek. Na Obrázku 10 můžeme vidět, jak různé složky atmosféry ovlivňují propustnost různých vlnových délek.

Kromě těchto technických parametrů hraje roli ve výběru detektoru také samozřejmě cena a energetická náročnost.



Obrázek 10 : Závislost atmosférické propustnosti na vlnové délce [29]

3.2 Volba detektoru

V dnešní době je na trhu dostupná celá řada detektorů s různými rozsahy měřených hodnot. Pro naše potřeby byl vybrán detektor MLX 90614, který je vyráběn firmou Melexis. Tato firma se specializuje na výrobu mikroelektronických integrovaných systémů. Tento modul obsahuje nejen detektor záření, ale i elektroniku potřebnou pro zpracování signálu. Součástí modulu je i optický filtr denního světla, který zajišťuje odolnost proti slunečnímu světlu. Tento filtr propouští záření s krátkou vlnovou délkou, čímž zabraňuje průchodu elektromagnetického vlnění v oblasti viditelného světla a v oblasti blízké infračervenému záření, čímž zajišťuje tomuto detektoru ochranu proti okolnímu prostředí a také proti slunečnímu záření. Filtr propouští záření vlnové délky 5,5-15 μm . Modul je vyráběn ve dvou variantách možného napájení a to pro napájecí napětí +3V a nebo +5V. My jsme zvolili pro naše účely detektor s napájecím napětím +5V. Tento detektor pracuje v rozsahu

teplot -40 až $+85^{\circ}\text{C}$, což přesně splňuje naše požadavky. Tento detektor je uložen v obalu TO-39. Přestože má modul široký teplotní rozsah, vyznačuje se také velkou přesností $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Lze také zakoupit speciální verzi tohoto detektoru, jehož přesnost je $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, která je vhodný pro lékařské využití, [9].



Obrázek 11: Detektor MLX 90614 [9]

Dalším kladem je také, že má režim spánku, který nám zajistí snížení spotřeby energie. Tento modul je schopen pracovat s vlnovými délkami v rozsahu $5,5\text{ }\mu\text{m}$ až $14\text{ }\mu\text{m}$, [9].

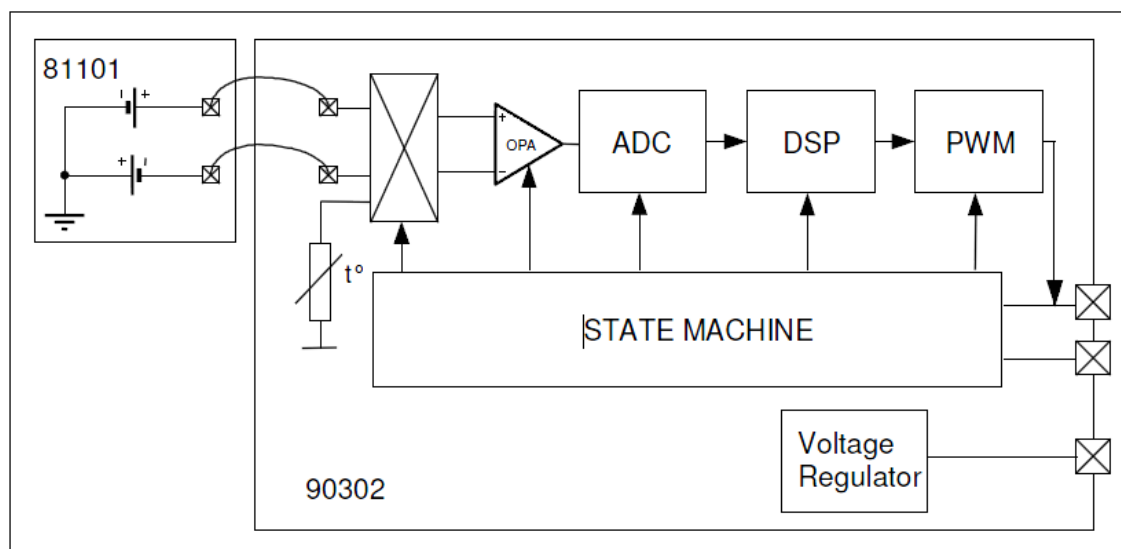
MLX 90614 je složen ze dvou částí, první část tvoří termoelektrický senzor IR záření MLX 81101 a druhá část zpracovává signál (MLX 90302). Vysoké přesnosti a dobrého rozlišení je dosaženo díky zesilovači s malým šumem, 17-bit převodníku A/D s vysokým rozlišením a výkonné jednotce provádějící digitální zpracování obrazu (MLX 90302), [9].

Operace modulu MLX90614 jsou řízeny integrovanou řídicí jednotkou („state machine“), která kontroluje proces měření a výpočtu teploty objektu a okolí. Zajišťuje také zprostředkování teplot na výstupu PWM nebo na SMBus kompatibilním rozhraní. Signál z obou senzorů je zesílen v zesilovači s nízkým výstupním šumem a převeden na analogovo/digitální měnič, který převede analogový signál na digitální, který můžeme dále zpracovávat v DSP („Digital signal processing“ – digitální zpracování obrazu). Dále je provedena filtrace pomocí programovatelných FIR a IIR filtrů s dolní propustí, aby bylo dosaženo snížení šířky pásma vstupního signálu, to zajistí požadovaný výkon šumu a obnovovací frekvenci. Na výstupu filtru IIR získáváme výsledek měření, který je následně ukládán do paměti RAM. Na základě měření jsou tedy vypočítány teploty okolí a objektu s přesností $0,01^{\circ}\text{C}$, [9].

Data o měření teploty objektu a okolí mohou být čtena dvěma způsoby:

- čtení z paměti RAM pomocí k tomu určeného rozhraní s přesností $0,02^{\circ}\text{C}$ a fixně daným rozhraním.
- pomocí digitálního výstupu PWM jehož rozlišení je 10 bitů a má nastavitelný rozsah, [9].

Všechny tyto části modulu MLX90614 jsou znázorněny na blokovém schématu na Obrázku 12.



Obrázek 12 : Blokové schéma MLX 90614, [9]

Výstupní signál detektoru je roven:

$$V_{ir}(T_a, T_0) = A \cdot (T_0^4 - T_a^4), \quad (28)$$

T_0 teplota měřeného objektu
 T_a teplota okolí termočláčku
 A citlivost detektoru, [9].

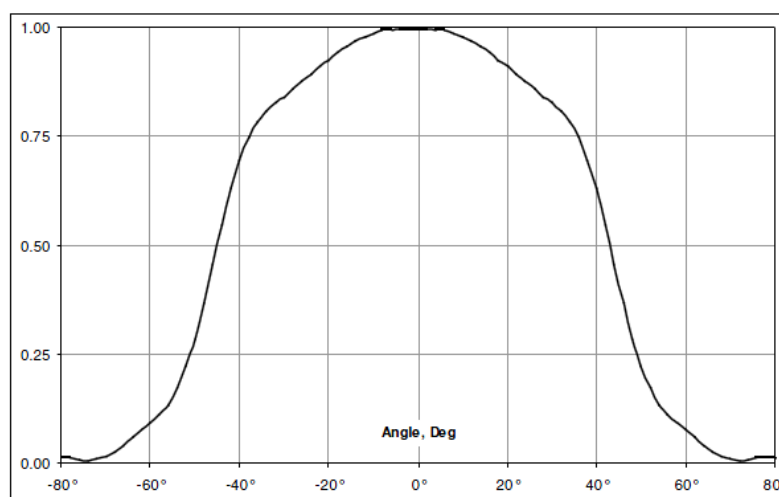
Velikost výstupního signálu je tedy přímo úměrná součinu parametru A a rozdílu čtvrtých mocnin teploty měřeného objektu a teploty okolí. Ze vzorce jasně plyne, že je-li teplota měřeného objektu větší než teplota okolí, bude výstupní signál kladný. Naopak je tomu v případě, kdy je teplota měřeného objektu menší než teplota okolí, v tomto případě bude výstupní signál záporný. Je-li teplota objektu i okolí stejná, pak je výstupní signál roven nule. Tento výpočet provádí zabudovaný DSP, jehož výstup je digitální a je přímo úměrný měřené teplotě, [9].

Změřené hodnoty T_a a T_0 jsou uloženy v paměti RAM a k jejich odvození jsou užity tyto dva vztahy:

$$T_a [^\circ K] = T_{areg} \times 0,02 \quad (29)$$

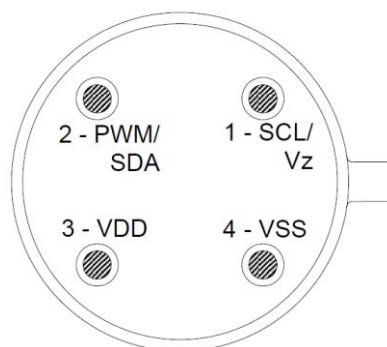
$$T_0 [^\circ K] = T_{0reg} \times 0,02, [9]. \quad (30)$$

Uvedená přesnost detektoru je garantována pouze v izotermálním prostředí, tedy v prostředí, kde nejsou v měřiči významné teplotní rozdíly. Teplotní rozdíly v měřiči mohou být způsobeny, například přítomností horkých nebo naopak velmi studených elektronických součástek v blízkosti detektoru. Abychom se vyhnuli těmto teplotním gradientům, je vhodné odstínit efekt těchto součástek ať už na straně detektoru nebo na straně těchto součástek s odlišnou teplotou. Na přesnost detektoru má také vliv velikost FOV (Field of View), neboť čím je FOV menší, tím je menší energie, která dopadá z objektu na detektor. V našem případě má detektor FOV rovnu 88 Deg při 50% citlivosti (viz Obrázek 13). Jak již víme, citlivost detektoru ovlivňuje i úhel dopadu signálové radiace na detektor, proto by mělo být naší snahou, aby signálová radiace dopadala na detektor pod úhlem 90° vzhledem k ose detektoru. Standardně je detektor z výroby kalibrován na měření objektů, jejichž emisivita je rovna 1. Toto nastavení lze však změnit a detektor může pracovat v rozsahu emisivit objektů 0,1-1. Výrobce nedoporučuje používat tento detektor na vzdálenost větší než 0,5 m, [9].



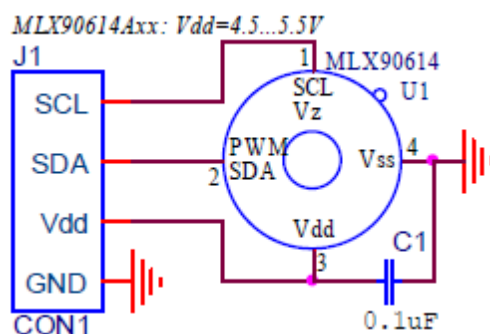
Obrázek 13 : Zorné pole modulu MLX 90614 [9]

Na Obrázcích 14 a 15 je znázorněn popis pinů detektoru a také jejich doporučené schematické zapojení v obvodu.



Obrázek 14 : Rozložení pinů MLX90614, [9]

- 1 – SCL/Vz – vstupní hodinový signál
- 2 – PWM / SDA – digitální vstup/výstup
- 3 – VDD - externí zdroj napětí
- 4 – VSS - GDN (uzemnění) – k tomuto pinu jsou připojeny také kovové části detektoru, [9].



Obrázek 15 : Doporučené schematické zapojení MLX90614, [9]

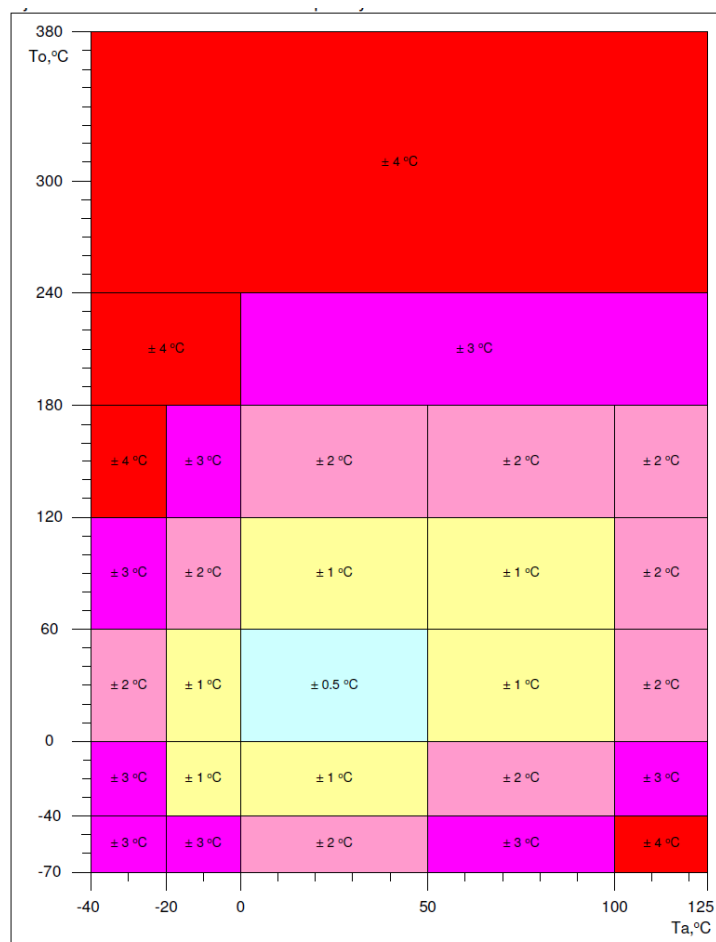
V následující Tabulce 1 jsou uvedeny základní parametry detektoru MLX90614.

Tabulka 1 : Parametry detektoru MLX90614, [9]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	5	V
Vstupní proud	1,3	mA
Citlivá oblast	1,2 x 1,2	mm ²
FOV	88	Deg
Průměr vstupního okénka	3,5	mm
Odpor termočlánku	60	kΩ
Šum	32	nV/√Hz
Datové pásmo PWM	10	bit
Výstupní perioda PWM	1,024	ms
Stabilita PWM	±10	%
Probouzecí interval	0,25	s

Tyto parametry jsou platné při T_a rovné 25°C.

Přesnost detektoru není v celém rozsahu teplot bohužel stejná a může se značně lišit. Závislost přesnosti detektoru je znázorněna na Obrázku 16 v závislosti na teplotě objektu a teplotě okolí.



Obrázek 16 : Přesnost měření detektoru v závislosti na teplotě objektu a okolí, [9]

Z této tabulky je jasné zřejmé, že nejpřesnějších hodnot dosáhneme, budeme-li měřit v rozsahu 0-60 °C teploty objektu a 0-50 °C teploty okolí tohoto objektu, kdy je teplota měřena s přesností $\pm 0,5^\circ\text{C}$. S rostoucí teplotou se přesnost detektoru rapidně zhoršuje a nepřesnost může nabývat hodnot až $\pm 4^\circ\text{C}$.

3.3 Volba pyrometrické metody

Při návrhu a konstrukci pyrometru je využito několik metod. V první řadě dochází k volbě metody měření. Tato volba je přímo závislá na zvoleném detektoru, což je v našem případě tepelný detektor, pro nějž je nejvhodnější využít metodu úhrnné pyrometrie. Dalším kritériem je také technika, kterou využíváme při zpracování vstupní signálové radiace. A právě na základě těchto kritérií lze pyrometry rozdělit na stejnosměrné a střídavé.

Stejnoseměrné (DC) pyrometry

Tyto pyrometry pracují se stejnosměrnou hodnotou signálové radiace. Jejich nevýhodou je, že jsou pomalejší a nejsou tedy vhodné pro zpracování měření, při nichž dochází k rychlým teplotním skokům. Naopak výhodou těchto pyrometrů je jejich jednoduchá konstrukce, která jim zajišťuje značnou oblíbenost. Cílem současné výroby těchto pyrometrů je jejich zrychlení a zpřesnění, neboť oproti střídavým pyrometrům nejsou natolik přesné a mají tedy i menší využití v praxi, [1].

Střídavé (AC) pyrometry

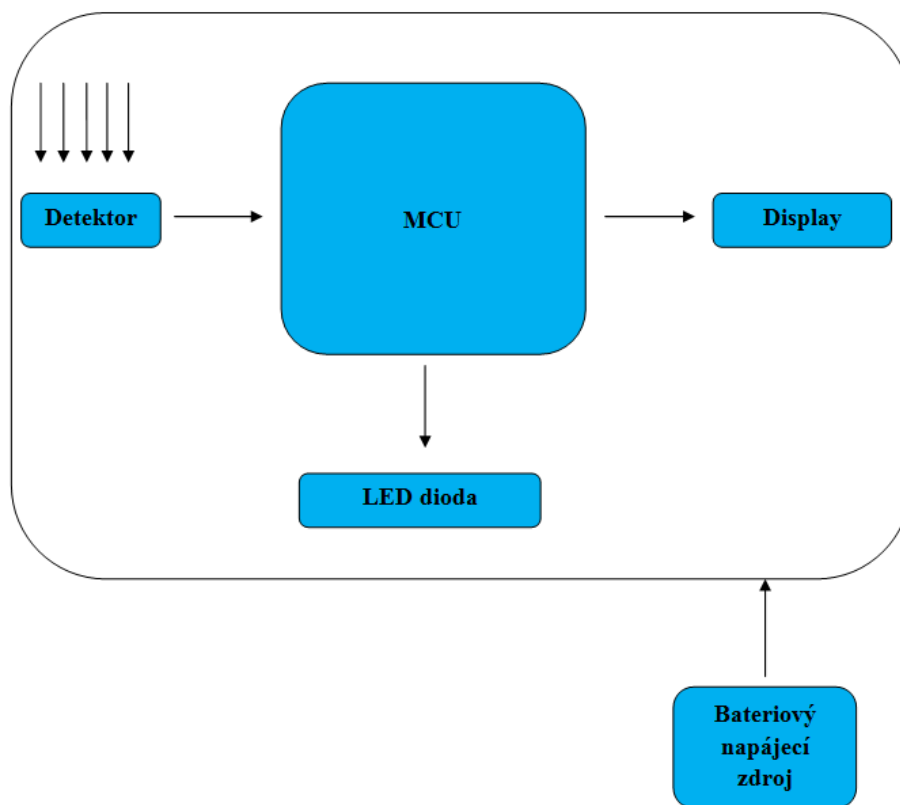
U těchto pyrometrů je nutné nejprve získat střídavý vstupní signál, který bude dále zpracován. K získání tohoto signálu slouží optický modulátor, tzv. CHOPPER. Vstupní stejnosměrný signál je přeměněn na střídavý periodický signál za využití referenčního radiačního zdroje. Chopper bývá konstruován jako rotační disk, na jehož povrchu jsou zářezy definovaného tvaru a velikosti. Právě tvar a velikost těchto zářezů udává tvar impulzů střídavého signálu. Tyto impulzy mohou být obdélníkové, lichoběžníkové nebo také trojúhelníkové. Naopak frekvence otáčení chopperu udává frekvenci tohoto signálu, tato frekvence bývá označovaná také jako chopprovací frekvence. Zvolením vhodné chopprovací frekvence lze potlačit také šum signálu. Nevýhodou těchto pyrometrů je jejich konstrukční náročnost, naopak se však vyznačují velkou přesností a dokáží rychle reagovat na tepelné změny, [1, 9].

Jak již bylo řečeno pro naše potřeby je zcela dostačující využití stejnosměrného úhrnného pyrometru, přičemž využíváme tepelný termočlávkový detektor. Využití střídavého pyrometru by pro nás nebylo velkým přínosem, neboť vzhledem k parametrům by byla jejich přesnost téměř srovnatelná. Důležitým aspektem pro výběr stejnosměrného pyrometru byla také jeho konstrukční jednoduchost, jak již bylo zmíněno výše.

3.4 Koncepční řešení IR teploměru

Samotný IR teploměr se bude skládat z několika základních částí. Těmi jsou optická soustava, detektor, MCU kontroler, displej a LED dioda. Avšak základní stavební jednotkou je detektor. Volba detektoru je závislá na rozsahu teplot, které chceme měřit, v našem případě tedy potřebujeme, aby pracoval v rozsahu teplot -20 až +50°C. Jako vhodný pro naše účely byl zvolen modul MLX 90614. Modul

MLX 90614 je složen ze dvou komponent – MLX81101 a MLX90302. MLX81101 je neselektivní tepelný detektor, z nějž je naměřený signál převeden na část MLX90302, kde dochází k zesílení signálu a jeho následné digitalizaci, naměřené hodnoty jsou ukládány do paměti RAM, [9].



Obrázek 17 : Blokové schéma IR teploměru

Optická soustava se skládá z čočky, clony a selektivního filtru. Čočka zajišťuje, aby záření bylo soustředěno na plochu detektoru. Při volbě čočky je nutné dbát na to, aby čočka byla vyrobena z materiálu, který je transparentní pro IR záření. Na trhu je dostupná celá škála těchto čoček, nejčastěji používané materiály jsou Si, Ge a ZnSe. Následkem využití těchto čoček je ztráta prostorového rozlišení, neboť na povrchu čočky dochází k chromatické aberaci a vzniká tedy několik optických ohnisek pro různé vlnové délky.

Pomocí selektivního filtru je určena část spektra záření, kterou chceme měřit. Selektivní filtry hrají důležitou roli při měření vysokých teplot, kdy by mohlo dojít k poškození detektoru. V našem případě se jedná o měření nízkých teplot a je tedy dostačující filtr, kterým je detektor vybaven již z výroby (viz Kapitola 3.2). Clona brání ozáření detektoru z jiných zdrojů.

Další částí sestavy je MCU, který provádí samotný výpočet teploty. MCU zodpovídá za činnost celého teploměru a je na něj připojen dále displej. MCU byl programován pomocí USB konektoru, na nějž se připojuje externí programátor.

V našem případě bylo využito programu Arduino, neboť použitý MCU je součástí vývojového kitu Arduino.

Připojená LED dioda slouží k zaměření místa měření teploty. Nejlépe je její umístění co nejbližší detektoru. Zároveň by LED dioda neměla nijak tepelně ovlivňovat detektor. Nejlépe se k zaměřování hodí laserová dioda. K tomu, aby dioda neovlivňovala měření ohřevem, lze využít chladičů laserových diod. Displej nám slouží k zobrazení vypočítané hodnoty teploty objektu. K napájení jednotlivých komponent IR teploměru je využit bateriový napájecí zdroj.

4 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ IR TEPLoměRU

V zadání diplomové práce je stanoveno, že se musí jednat o bateriově napájený IR teploměr. Bateriové napájení poskytuje řadu výhod, především co se týká praktičnosti využití celého zařízení v terénu, neboť zařízení není nijak závislé na rozvodné síti.

Návrh napájení vychází z požadavků detektoru pro napájení 4,5-5V. Abychom dosáhli co nejnižšího odběru z baterie a zároveň zachovali jednoduchost, bylo zvoleno nesymetrické napájení +5V a GND. Při výběru zbylých obvodových součástek bylo právě k tomuto přihlédnuto. V Tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty napájecího napětí a odběr proudu jednotlivých součástek. U hodnot odběrových proud je počítáno s maximálními možnými hodnotami.

Energetická rozvaha

Tabulka 2 : Energetická náročnost použitých součástek

Součástka	Napájecí napětí (V)	Odběr (mA)
MLX90614	4,5-5	2,5
ATmega 328P	1,8-5,5	9
LM650-D6	3	30
POWER TIP PC1602FB	4,5-5,5	1,2
AMSR1-7805-NZ	6,5-30	7
Celkem:		49,7 mA

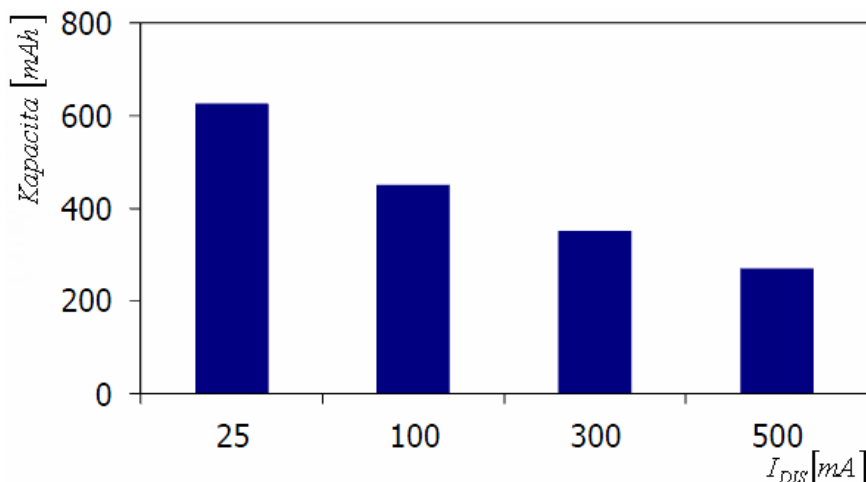
DC-DC měnič AMSR1-7805-NZ

Tento měnič pracuje se vstupním napětím v rozsahu 6,5-32 V, na jehož výstupu získáváme stabilní napětí 5V. Jedná se o pasivně chlazený měnič, který pracuje při teplotách -40 až +85°C. Vyznačuje se také velkou efektivitou, která dosahuje až 96% a zároveň jeho hodnota šumu je minimální. Tento měnič je přímo výrobcem doporučován pro bateriově napájená zařízení, která jsou řízená pomocí MCU, [6].

Baterie

Minimální hodnota vstupního napětí u měniče AMSR1-7805-NZ je 6,5 V, tento měnič nám zajistí, že na výstupu získáme napětí 5V. Maximální možná vstupní hodnota napětí je 18V. Při výběru baterie hraje roli také počáteční a konečná hodnota napětí, vybíjecí charakteristika. Pro naše účely byla zvolena baterie značky Energizer

typ 6LR61, jejíž počáteční hodnota napětí je 9V a konečná hodnota při vybití je 4,8V. Kapacita baterie je 625 mAh, odběr námi navrhnutého pyrometru je 49,7 mA. Baterie by měla tedy vydržet v provozu cca 12,5 hodiny. Tato baterie je vyrobena z Zn/MnO₂ a její pracovní teplota je -18 až +55 °C pro 100% využití baterie, [8].



Obrázek 18 : Kapacita baterie Energizer 6LR61, [8]

4.1 Obvodové prvky a jejich zapojení

K zakreslení navrženého schématu zapojení bylo využito CAD Softwaru Eagle 6.5.0., tento program také posloužil k navržení desky plošného spoje. Na Obrázku 19 je znázorněno schéma celého IR teploměru i s napájecí částí. Dále na Obrázku 24 a 25 můžeme vidět desku plošného spoje a osazení této desky součástkami.

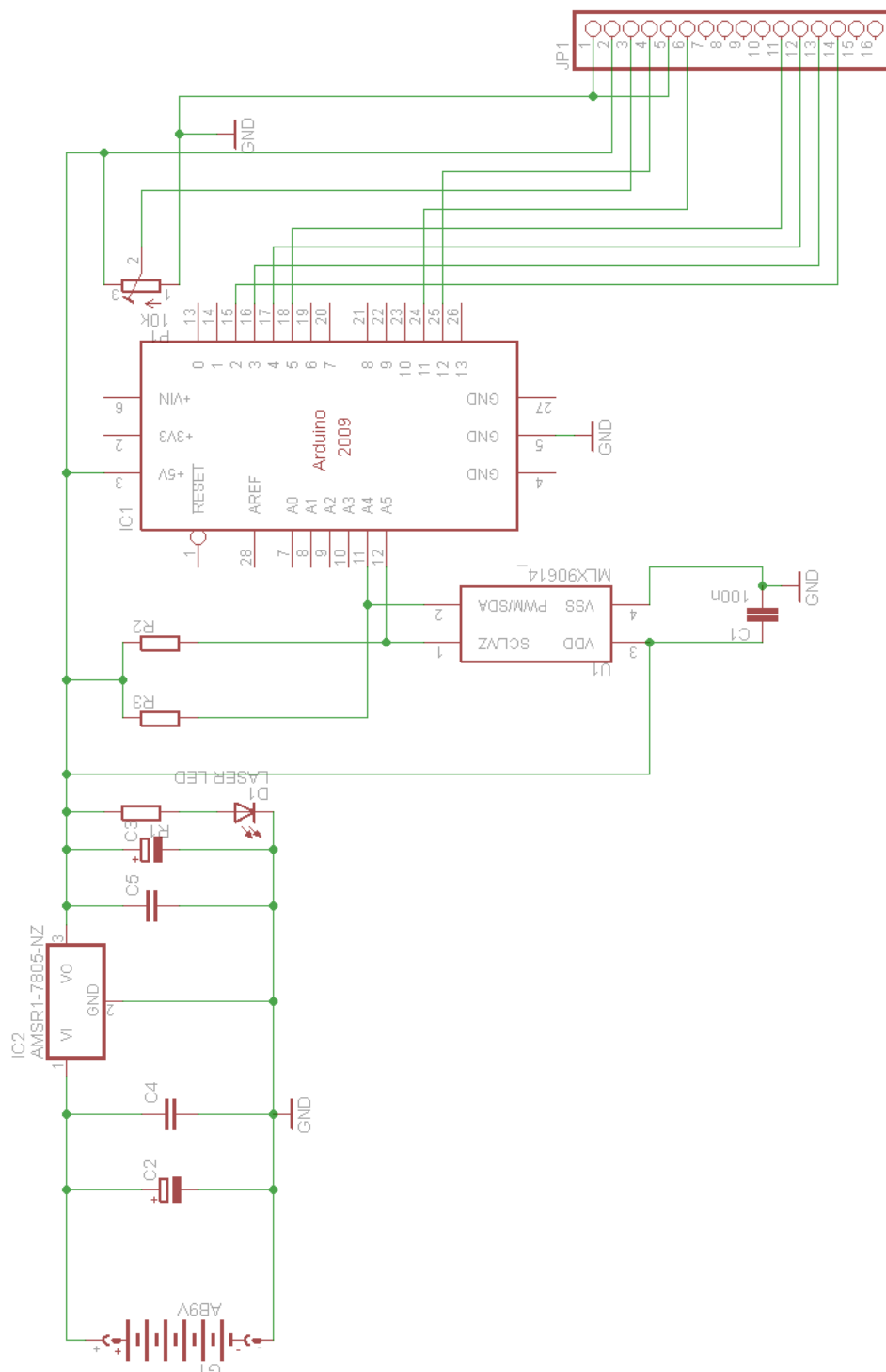
Ze všeho nejdříve bylo třeba zvolit hodnotu nárazového kapacitátoru C2, ta byla zvolena 50 μ F. Jedná se o elektrolytický kondenzátor, který slouží k vyrovnávání energetických nárazů po zapnutí teploměru. Dále byly určeny hodnoty kondenzátorů C4 a C5, které nám slouží jako pomocné součástky u DC-DC měniče a zajišťují nám tak stabilní výstupní napětí. Podle doporučení výrobce měniče byla zvolena hodnota C4 a C5 rovna 100 nF. Abychom zabránili dalšímu šíření střídavých rušivých signálů, byl do obvodu zabudován také kondenzátor C3, jedná se opět o elektrolytický kondenzátor, jehož hodnota byla dostačující v rozmezí 50-100 nF.

Dále jsme zvolili jako zaměřovací diodu laserový modul LM-650D6. Tomuto modulu bylo třeba předřadit odpor, abychom na diodě získali požadované napětí a proud. Pracovní napětí diody je $U_d=3$ V a proud $I_d=20$ mA.

(31)

(32)

Hodnota předřadného rezistoru před LED diodou R1 byla vypočtena na 100Ω .



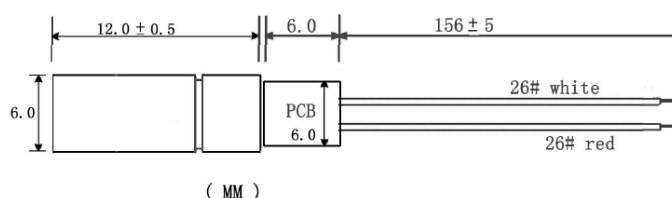
Obrázek 19 : Schéma zapojení IR teploměru

Laserový modul LM650-D6

Tento modul slouží k zaměřování objektů, jejichž teplotu měříme. Jedná se o laserový modul, který obsahuje laserovou diodu, optickou soustavu, [11]. Parametry laserového modulu jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry laserového modulu LM650-D, [11]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	3,5	mW
Pracovní napětí	3	V
Pracovní proud	20-30	mA
Vlnová délka	650	nm
Životnost	5000	hodin



Obrázek 20 : Laserový modul LM650-D6, [11]

Modul MLX90614

Parametry tohoto modulu byly popsány již výše v Kapitole 3.2.

Displej PC1602-LRU-FWA-B-Q

K zobrazení změřené teploty objektu nám posloužil LCD displej, který je 16-ti znakový a dvouřádkový. Tento displej pracuje se vstupním napětím 5V a vstupním proudem 1,2 mA. Výhodou tohoto displeje je jeho pracovní teplota, která je v rozsahu od -20 až do +70°C. Aktivní plocha displeje je 56,21 x 11,5 mm. Kontrast displeje lze měnit připojením odporu k pinu 3. V našem případě k tomu byl využit trimr s nastavenou hodnotou 10 kΩ, což je maximální možná přípustná hodnota. K MCU lze displej připojit dvěma způsoby, a to buď 4-bitovým nebo 8-bitovým způsobem. V tomto případě bylo použito 4-bitové připojení datovými vodiči D4-D7, je tak nastaveno pouze na zápis. Displej je připojen k MCU jen piny E a RS, pin R/W je uzemněn, [10].

V Tabulce 4 jsou uvedeny jednotlivé piny displeje a jejich funkce.

Tabulka 4 : Piny displeje, [10]

Pin	Označení	Funkce
1	Vss	GND
2	Vdd	Napájení +5V
3	V ₀	Ovládání kontrastu
4	RS	Přenos instrukcí
5	R/W	Čtení/zápis
6	E	Zapnutí komunikace
7	DB0	Datový přenos
8	DB1	Datový přenos
9	DB2	Datový přenos
10	DB3	Datový přenos
11	DB4	Datový přenos
12	DB5	Datový přenos
13	DB6	Datový přenos
14	DB7	Datový přenos
15	A	Podsvícení +5V
16	K	Podsvícení GND



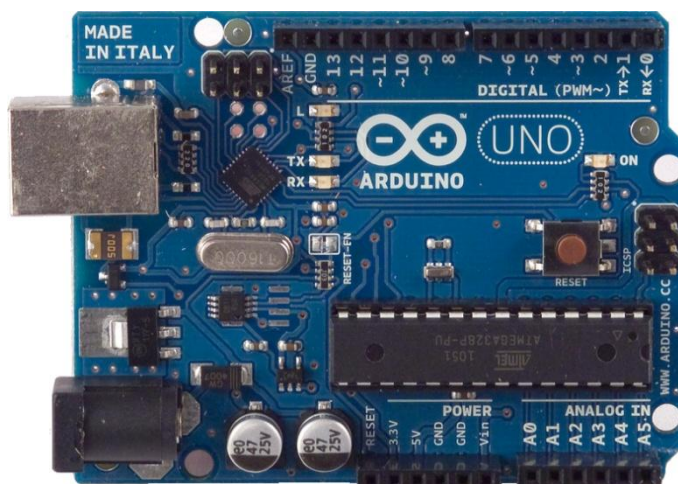
Obrázek 21 : Displej PC1602-LRU-FWA-B-Q, [10]

Arduino UNO + ATmega32

K výpočtu teploty objektu je využíván MCU ATmega328P (vyráběn firmou Atmel), který je připevněn k vývojovému kitu Arduino UNO. Kromě MCU ATmega328P byl z tohoto vývojového kitu využit také USB konektor, který sloužil k připojení k PC. Přes nějž byl do MCU nahrán ovládací program, který byl vytvořen v Arduino studiu.

Jak již bylo řečeno ATmega328P je programovatelný MCU, který pracuje při napětí 1,8 - 5,5V. ATmega328P je 8-bitový mikrokontroler se čtyřmi vstupně-výstupními porty (A-D). Port A může být využit jako A/D převodník, port B jako komparátor napětí, k portu C je připojen displej, neboť se jedná o vstupně-výstupní port, který nemá žádnou specifickou funkci. Port D obsahuje piny, které slouží

pro externí komunikaci. Tento mikrokontroler je vybaven dále také samostatným zdrojem hodinového signálu, který má frekvenci 20 MHz. MCU je také vybaven 32 Kbyty flash paměti, do které nahráváme ovládací program. Velkou výhodou MCU je jeho schopnost pracovat v široké škále teplot a to v rozmezí -40 až +80°C, [7].



Obrázek 22 : Arduino UNO s procesorem ATmega328P, [7]

(PCINT14/RESET) PC6	1	28	PC5 (ADC5/SCL/PCINT13)
(PCINT16/RXD) PD0	2	27	PC4 (ADC4/SDA/PCINT12)
(PCINT17/TXD) PD1	3	26	PC3 (ADC3/PCINT11)
(PCINT18/INT0) PD2	4	25	PC2 (ADC2/PCINT10)
(PCINT19/OC2B/INT1) PD3	5	24	PC1 (ADC1/PCINT9)
(PCINT20/XCK/T0) PD4	6	23	PC0 (ADC0/PCINT8)
VCC	7	22	GND
GND	8	21	AREF
(PCINT6/XTAL1/TOSC1) PB6	9	20	AVCC
(PCINT7/XTAL2/TOSC2) PB7	10	19	PB5 (SCK/PCINT5)
(PCINT21/OC0B/T1) PD5	11	18	PB4 (MISO/PCINT4)
(PCINT22/OC0A/AIN0) PD6	12	17	PB3 (MOSI/OC2A/PCINT3)
(PCINT23/AIN1) PD7	13	16	PB2 (SS/OC1B/PCINT2)
(PCINT0/CLKO/ICP1) PB0	14	15	PB1 (OC1A/PCINT1)

Obrázek 23 : Pouzdro ATmega328P, [7]

Obvodové prvky

Další součástí je kapacitátor C1 (100 nF), jehož hodnota byla doporučena výrobcem detektoru firmou Melexis. Tento filtr je připojen k pinům Vdd a Vss detektoru, kde slouží k udržení stability a zároveň jako šumový filtr. Je nutné, aby byl tento keramický kondenzátor připevněn co nejblíže k detektoru. Nebude-li tomu tak, hrozí nám poškození celého čidla, a nebo dokonce i vývojového kitu Arduino.

V neposlední řadě jsou zde umístěny také rezistory R2 a R3, jejichž hodnota je 4,7 kΩ. Jedná se o tzv. pull-up rezistory, které jsou připojeny mezi výstupy SDA, SCL a mezi kladné napájecí napětí. Tyto rezistory nejsou při krátké vzdálenosti sběrnice

nezbytně nutné, pokud jsou použity interní pull-up rezistory procesoru. Avšak k zajištění stability je vhodnější je použít.

V Tabulce 5 je uveden seznam všech použitých součástek, které byly využity k sestavení navrhnutého IR teploměru.

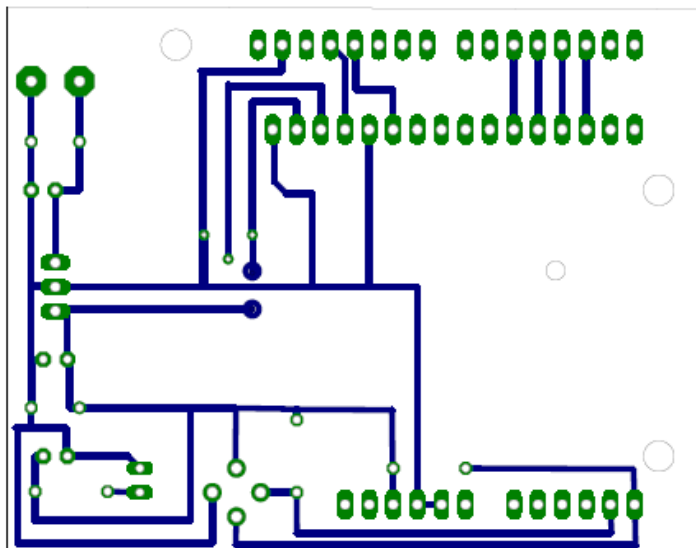
Tabulka 5 : Soupiska součástek IR teploměru

Označení	Název	Hodnota
Detektor	MLX90614	7mA
Vývojový kit	Arduino UNO	1,8-5,5V / 9mA
Laserový modul	LM650-D6	20mA / 3V
Stabilizátor	AMSR1-7805-NZ	5V / 2A
Displej	POWER TIP PC1602FB	4,5-5,5V / 1,2mA
Baterie	Energizer 6LR61	9V / 625mAh
Trimr P1	PT15NVK025	10 k Ω
R1	RR100R	100 Ω
R2	RRU 4R7	4,7 k Ω
R3	RRU 4R7	4,7 k Ω
C1	CK100N	100nF
C2	CE47U	47 μ F
C3	CE47U	47 μ F
C4	CK100N	100nF
C5	CK100N	100nF

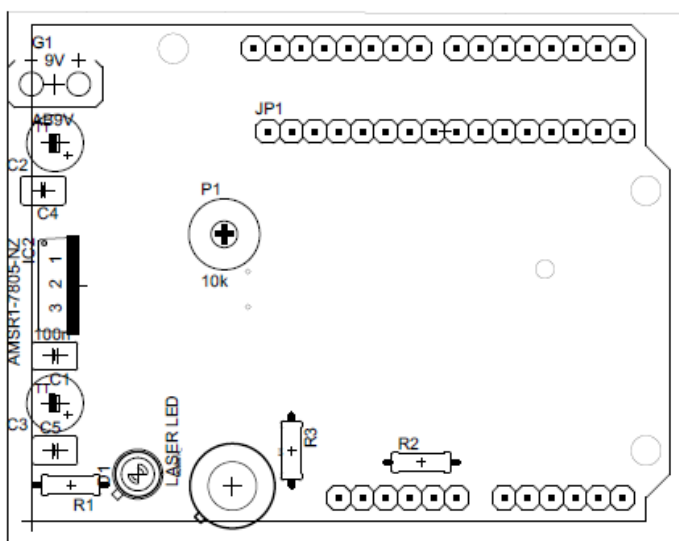
4.2 Návrh plošného spoje

Jak již bylo řečeno, k vytvoření návrhu schématu zapojení IR teploměru a také plošného spoje bylo využito programu Eagle 6.5.0., jehož na internetu volně přístupná verze je omezena pouze na práci s velikostí desky plošného spoje 10 x 10 cm, což bylo pro naše účely zcela dostačující. Díky menšímu množství součástek a celkové jednoduchosti zařízení nebylo třeba rozdělit napájecí obvod a samotnou výpočetní a zobrazovací část a díky tomu byla vytvořena pouze jedna deska plošných spojů. K výrobě bylo použito jednovrstevné desky. Samotná deska plošných spojů nepřesahuje svými rozměry velikost vývojového kitu Arduino UNO, proto abychom pro praktičnost zajistili co nejmenší rozměry této desky, byla deska osazena kitem Arduino zespodu a zbytek součástek byl osazen shora desky. Na Obrázku 24 je znázorněn náčrt desky plošného spoje. Modře jsou označeny vodivé spoje, zeleně jsou označeny body, kde jsou označeny jednotlivé součástky a dvě modré tečky jsou místa, kde jsou umístěny drátové propojky, které bylo nutné aplikovat kvůli křížícím se spojům. Displej byl k desce plošných spojů připevněn pomocí dutinkové lišty, jejíž rozestupy jsou

2,54 mm, do nichž přesně zapadají piny displeje. Naopak k připevnění celého vývojového kitu Arduino posloužily násuvné vidlice, také s rozestupy 2,54 mm. Návrh plošného spoje je znázorněn na Obrázku 24 a na Obrázku 25 je znázorněno osazení desky součástkami.



Obrázek 24 : Deska plošného spoje IR teploměru, poměr 1:1,2 (1:1 = 7,5:5,9 cm)



Obrázek 25 : Osazení součástek IR teploměru, poměr 1:1,2 (1:1 = 7,5:5,9 cm)

4.3 Programové řešení

Vytvořený a nahraný program v MCU slouží k výpočtu změřené teploty objektu a k jejímu zobrazení na displeji. K zařízení není připojeno žádné spouštěcí tlačítko, proto k měření teploty dochází okamžitě po připojení baterie, hned poté je také zobrazena na displeji naměřená hodnota ve stupních Celsia. Přerušování měření nastává až při odpojení baterie. Kromě výpočtu a zobrazení teploty na displeji dochází při sepnutí teploměru také k okamžitému rozsvícení laserové zaměřovací diody.

Program je napsán pomocí programovacího jazyka C a k jeho tvorbě byl využit program Arduino, který je produktem firmy Arduino. Při spuštění program nehlásí žádné chyby ani varovná hlášení. Na Obrázku 26 je znázorněno schéma programového řešení IR teploměru. Jedná se o jednoduchý návrh, který slouží čtenáři pouze k vytvoření jednoduché představy, jakou funkci plní MCU při měření teploty objektu pomocí navrženého IR teploměru.

Je nutno také podotknout, že MCU zpracovává digitální informace získané od modulu MLX90614. K výpočtu výstupního signálu detektoru MLX90614 slouží rovnice 28, která je již uvedena v Kapitole 3.2. Z tohoto vztahu byla pomocí matematických operací odvozena rovnice pro výpočet teploty objektu, která má tvar:

$$T_O = \sqrt[4]{\frac{U_{ir}}{A} + T_A^4} \quad (33)$$

U_{ir} je výstupní napětí
 T_A teplota okolí
 A citlivost detektoru

V našem případě je citlivost detektoru rovna $4,28 \cdot 10^{-13} \text{ V} \cdot \text{K}^{-4}$, [9].

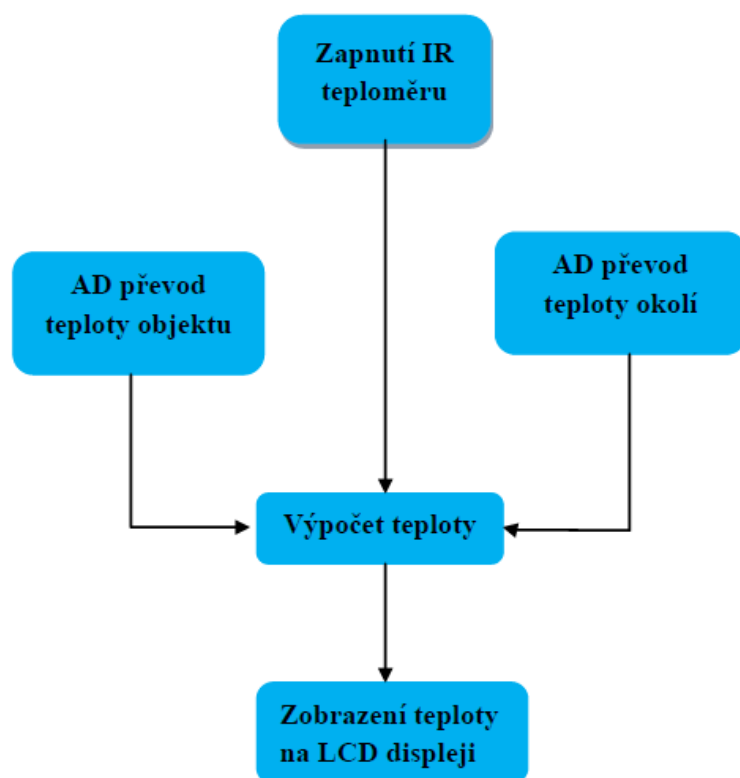
Naše měření nebere v potaz rozdílnost emisivit různých povrchů objektů a měření probíhá při přednastavené emisivitě 1, což je emisivita AČT. Pokud bychom chtěli při výpočtu teploty objektu počítat i s odlišnou emisivitou objektů, bylo by nutno její hodnotu doplnit do rovnice 28. Pokud bychom chtěli při konstrukci teploměru použít i přídavné IR čočky, tak by s nimi bylo nutno v tomto vztahu také počítat.

Výsledná rovnice by měla tento tvar:

$$T_O = \sqrt[4]{\frac{U_{ir}}{A \cdot \varepsilon \cdot \tau_{\zeta}}} + T_A^4 \quad (34)$$

ε emisivita

τ_{ζ} propustnost čočky, [9].



Obrázek 26 : Schéma programového řešení

Program MCU

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <i2cmaster.h>
// vyvolání knihoven s čísly pinu

//12=RS,13=E,5=D4,4=D5,3=D6,2=D7

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

byte degreesymbol[8] = {
  0B11100,
  0B10100,
  0B11100,
  0B00000,
  0B00000,
  0B00000,
  0B00000,
  0B00000
};

void setup(){
  i2c_init();                                //načtení sběrnice i2c
  PORTC = (1 << PORTC4) | (1 << PORTC5);    //aktivace výstupu portu c4 a c5
  lcd.begin(16,2);
  lcd.clear();
  delay(100);
  lcd.print("Teplota");
  lcd.createChar(0, degreesymbol);
}

void loop(){
  int dev = 0x5A<<1;
```

```

int data_low = 0;
int data_high = 0;
int pec = 0;
i2c_start_wait(dev+I2C_WRITE);
i2c_write(0x07);

// načtení
i2c_rep_start(dev+I2C_READ);
data_low = i2c_readAck();           //přečtení 1 bytu a odeslání dat
data_high = i2c_readAck();          //přečtení 1 bytu a odeslání dat
pec = i2c_readNak();
i2c_stop();

//převod high i low bytů a zpracování teploty, MSB je chybný bit a je dočasně
ignorován

double tempFactor = 0.02; // 0,02 stupně na LSB, což je rozlišení detektoru
MLX906140
double tempData = 0x0000;           // vynuluje data
int frac;                           // data za desetinou čárkou

// překrytí chybného bitu high bytem, potom posun o 8 bitu doleva a přidání low bytu
tempData = (double)((((data_high & 0x007F) << 8) + data_low));
tempData = (tempData * tempFactor)-0.01;

float celcius = tempData - 273.15;   //přepočet na stupně celsia

// LCD display
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print(celcius);
lcd.write(byte(0));
lcd.print("C");
}

```


5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V rámci splnění zadání diplomové práce byla prostudována problematika měření teploty, kdy jsme se zaměřili především na metody bezkontaktního měření teploty. Na základě získaných informací byla provedena rešerše, která je podle logického řádu uspořádána a rozdělena do několika kapitol a podkapitol na začátku diplomové práce.

V dalším kroku bylo provedeno navržení samotného IR teploměru, výpočet a navržení použitých součástek, jejich schematické zakreslení a poté návrh desky plošného spoje. K těmto účelům byl použit program Eagle 6.5.0. Blokové (Obrázek 17) i obvodové schéma IR teploměru (Obrázek 19), návrh desky plošného spoje (Obrázek 24) a plánek osazení součástek (Obrázek 25) jsou obsaženy v diplomové práci. Jsou zde popsány jednotlivé součásti tohoto teploměru, jejich charakteristiky a parametry. V práci samozřejmě také nechybí soupiska součástek (Tabulka 5). Během návrhu teploměru a výběru součástek bylo třeba respektovat požadavek, že IR teploměr musí měřit teplotu v rozsahu -20 až $+50^{\circ}\text{C}$.

5.1 Experimentální ověření funkčnosti IR teploměru

Experimentálně byla ověřena funkčnost sestrojeného IR teploměru a výsledky měření byly porovnány s hodnotami, které byly naměřeny bezkontaktním IR teploměrem Voltcraft IR-900-30S. Tento teploměr byl zapůjčen od firmy Kovovýroba Svitálek a hodnoty získané z tohoto měření jsou pouze kontrolní. Teploměr Voltcraft IR-900-30S pracuje v rozsahu teplot -50 až $+900^{\circ}\text{C}$ a to s přesností $\pm 1^{\circ}\text{C}$, což je asi 1,5%. Součástí tohoto měřicího přístroje je také zaměřovací laser, který slouží k zaměření místa měření na povrchu objektu. Dále je teploměr vybaven také alarmem, který signalizuje případné překročení přednastavené teploty, funkcí trvalého měření, podsvíceným displejem a také funkcí automatického vypnutí. Stejně jako námi sestrojený teploměr je tento teploměr také napájen 9V baterií. Teploměr Voltcraft je znázorněn na Obrázku 27, [12].



Obrázek 27 :IR teploměr Volcraft IR-900-30S, [12]

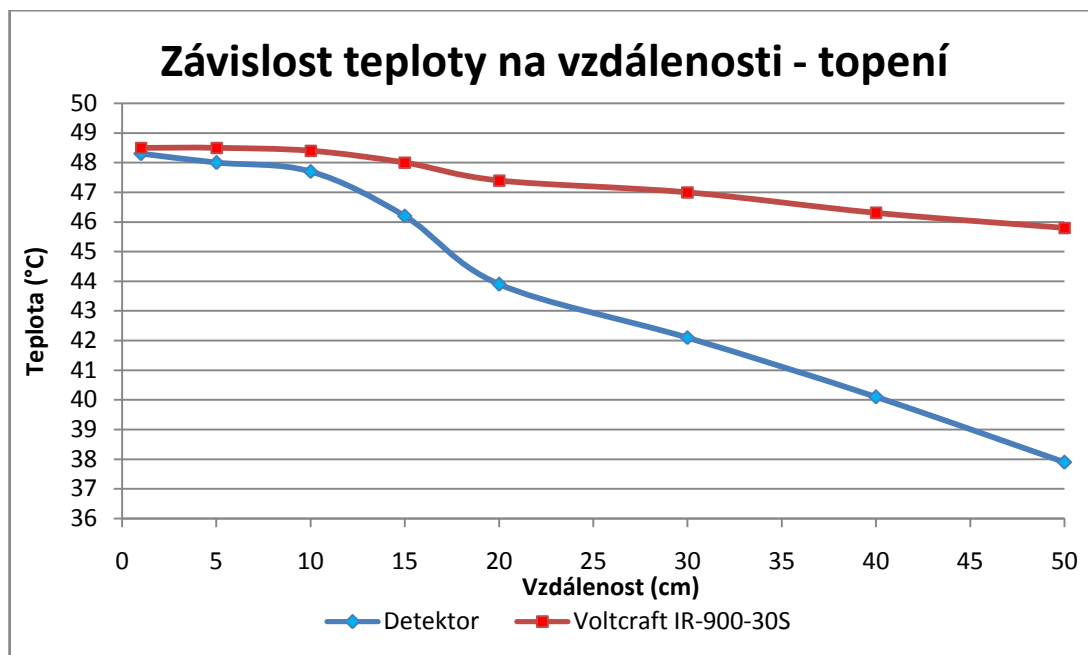
Přestože námi sestrojený IR teploměr je schopen měřit teplotu objektů s rozlišením dvou desetinných míst, teploměr značky Voltcraft má rozlišení pouze 0,1°C, proto hodnoty naměřené na sestrojeném teploměru byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo.

Pro zjištění přesnosti měření závislé na vzdálenosti detektoru od objektu nám posloužil jako měřený objekt teplé topení v místnosti, kde byla teplota asi 21,5°C (tato teplota byla odečtena pomocí rtuťového teploměru umístěného v místnosti). Toto měření nám poskytlo údaje v oblasti kladných hodnot. Abychom mohli porovnat spolehlivost teploměru i v oblasti záporných hodnot, jako druhý měřený objekt sloužil mrazák chladničky Electrolux. Teplota v místnosti byla 21,0°C, tato teplota byla odečtena z digitální meteorologické stanice umístěné v místnosti.

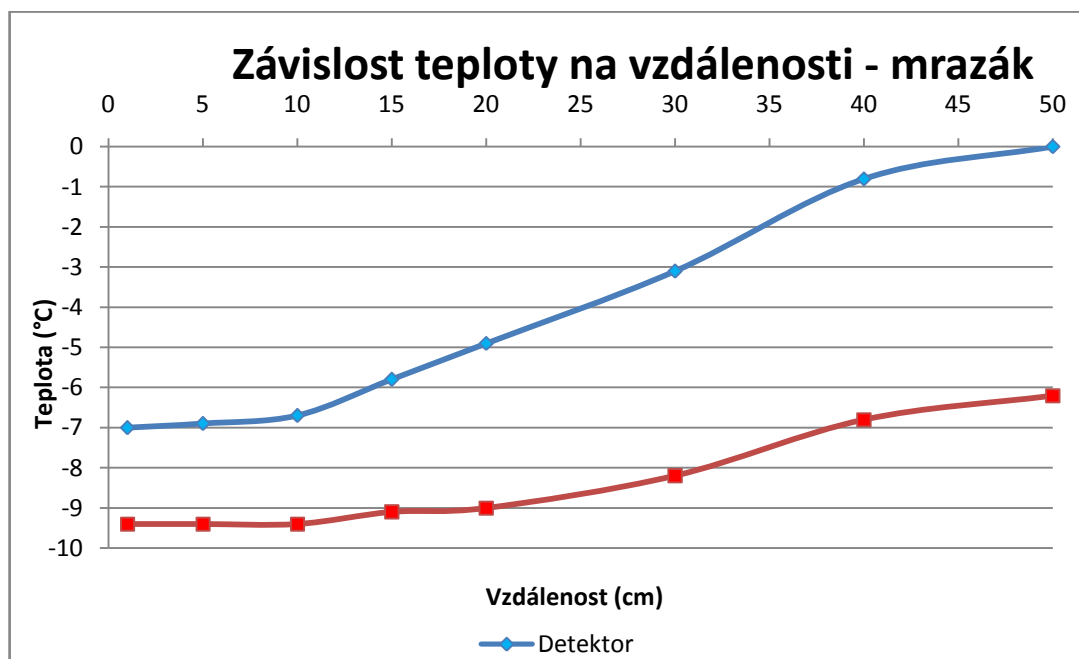
Měření byla prováděna ze vzdáleností 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40 a 50 cm. Z větší vzdálenosti nebylo měření prováděno, neboť použitý detektor MLX90614 je podle informací od výrobce vhodný pouze pro měření do vzdálenosti 50 cm. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6 : Naměřené hodnoty teplot v závislosti na vzdálenosti měření

Vzdálenost (cm)	Detektor (°C)		Voltcraft IR-900-30S (°C)	
	Topení	Mrazák	Topení	Mrazák
1	48,3	-7,0	48,5	-9,4
5	48,0	-6,9	48,5	-9,4
10	47,7	-6,7	48,4	-9,4
15	46,2	-5,8	48,0	-9,1
20	43,9	-4,9	47,4	-9,0
30	42,1	-3,1	47,0	-8,2
40	40,1	-0,8	46,3	-6,8
50	37,9	0	45,8	-6,2



Obrázek 28 : Graf závislosti teploty na vzdálenosti - topení



Obrázek 29 : Graf závislosti teploty na vzdálenosti - mrazák

Z naměřených hodnot je patrné, že naměřená teplota obou objektů není s rostoucí vzdáleností obou měřičů od objektů konstantní, ale naopak se s rostoucí vzdáleností od objektů se značně liší. Při porovnání naměřených hodnot naměřených na topení pomocí sestrojeného detektoru je jasně vidět velký rozdíl mezi naměřenou hodnotou ze vzdálenosti 1 cm a ze vzdálenosti 50 cm. Rozdíl těchto naměřených hodnot

je 10,4°C. Přestože u zapůjčeného IR teploměru značky Voltcraft je také patrný rozdíl při měření v jednotlivých pozicích, avšak tento rozdíl není tak velký. Rozdíl mezi měřeními ve vzdálenosti 1 cm a 50 cm u teploměru Voltcraft je pouze 2,7 °C.

Podobných výsledků bylo dosaženo i při měření teploty v mrazáku. V tomto případě dosáhl sestrojený teploměr lepších výsledků, ale i tak rozdíl mezi hodnotami naměřenými ze vzdálenosti 1 cm a 50 cm je 7°C. Stejně jako v předchozím případě dosáhl teploměr Voltcraft IR-900-30S lepších výsledků než sestrojený teploměr. V tomto případě je rozdíl teplot v krajních měřených vzdálenostech 3,2 °C.

K názornému porovnání byl vytvořen graf na Obrázku 28 pro hodnoty naměřené na topení a graf na Obrázku 29 pro hodnoty naměřené v mrazáku. Jak lze v obou grafech vidět, u obou detektorů s rostoucí vzdáleností klesá jejich spolehlivost. Avšak u teploměru Voltcraft IR-900-30S se jedná pouze o nepatrné rozdíly. Na obou grafech lze pozorovat, že klesající spolehlivost naměřených dat je v obou případech téměř lineární. Obecně lze říci, že sestrojený detektor vykazoval větší spolehlivost při měření v oblasti záporných hodnot a to zejména do vzdálenosti 10 cm. Přestože spolehlivost naměřených dat u sestrojeného detektoru byla horší při měření v oblasti kladných hodnot, tak je také zřejmé, že spolehlivost začala klesat rapidně až ve vzdálenosti větší než 10 cm.

Přestože výrobce uvádí, že detektor MLX90614 je vhodný pro měření do vzdálenosti 50 cm, tak jej nedoporučuji používat pro měření ze vzdálenosti větší než 15 cm. Bude-li teploměr používán pro větší vzdálenosti, pak nelze považovat naměřené výsledky za spolehlivé a neodpovídají tedy skutečným teplotám objektů.

5.2 Chyby měření a jejich řešení

Dle výsledků z Kapitoly 5.1 je jasně patrné, že během měření dochází k zásadním odchylkám od reálných teplot objektů. Změnu naměřené teploty dle vzdálenosti u teploměru Voltcraft IR-900-30S připisují z části 1,5% nepřesnosti měření, která je uváděna výrobcem, ale zároveň je předpokladem, že tento měřicí přístroj není správně kalibrován, poněvadž žádný ze zaměstnanců není obeznámen s posledním termínem kalibrace tohoto přístroje a nebyly nalezeny také žádné záznamy, které by opětovnou kalibraci potvrzovaly.

Přestože v této kapitole jsou navrženy možnosti vylepšení konstrukce tohoto IR teploměru, je třeba mít na paměti, že i s rostoucím množstvím součástek a samozřejmě i s jejich složitostí, roste konstrukční obtížnost a výsledná cena celého měřicího přístroje.

Vliv zaměřovací LED diody

Na výsledek měření teploty může mít vliv použitá LED dioda, která svou činností produkuje teplo. Vzhledem k faktu, že zaměřovací LED dioda musí být co nejbližší k detektoru MLX90614, je nutné její efekt na výsledky měření zcela odrušit nebo při nejmenším alespoň zeslabit. Jako možné řešení lze navrhnout, aby do programu v MCU byla přidána funkce, která zajistí vypínání a zapínání LED diody vždy pouze na zaměření a pak po sepnutí detektoru by došlo k jejímu vypnutí. V provozu by teda byla pouze v době, kdy je detektor neaktivní.

Jako další možné řešení lze navrhnout také užití chladiče LED diody, který zabrání šíření tepla z LED diody směrem k detektoru. LED dioda vybavena tímto chladičem je zobrazena na Obrázku 30.



Obrázek 30 : LED dioda s chladičem, [15]

Kalibrace

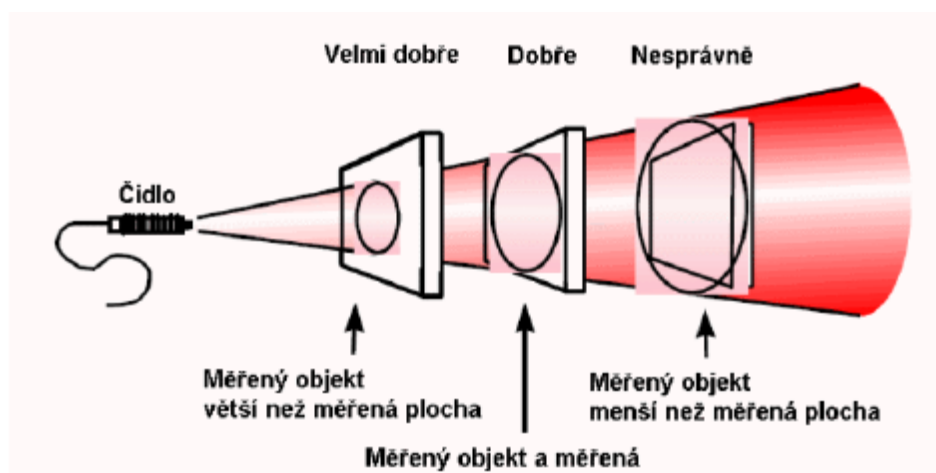
I přes snahu výrobce vytvářet identické a přesné detektory dochází při výrobě k nepřesnostem. Tyto nepřesnosti následně mohou ovlivnit výsledky měření. V závislosti na míře odlišnosti je pak úměrná i chyba měření. Každý výrobce s touto chybou proto počítá a zákazníkovi udává pouze normálovou hodnotu, od níž se výrobek odlišuje v rozsahu $\pm \%$. Z toho důvodu je nezbytně nutné všechny přístroje kalibrovat. Každý nový výrobek je od výrobce kalibrován, ale uživatel by jej měl poté znovu překalibrovat.

Kalibraci je možno provádět několika způsoby:

- pomocí simulátoru AČT – jako simulátor AČT lze použít dutinku zahřátou na určitou kalibrační teplotu nebo wolframovou lampu
- porovnáním s již kalibrovaným pyrometrem.

Velikost měřené plochy

Výrobce detektoru IR záření udává vždy v katalogovém listu nutné pokrytí měřicí oblasti, jinak také označováno jako zorné pole. Toto zorné pole roste se čtvercem vzdálenosti od měřeného objektu. Ideální situace nastává, je-li měřený objekt větší než zorné pole, popřípadě je jeho velikost totožná s velikostí zorného pole. K chybnému měření však dochází v případě, kdy zorné pole přesahuje svou velikostí měřený objekt. V tom případě dochází totiž také k měření teploty okolí tohoto objektu, [3]. Popsaná situace je vyznačena na Obrázku 31.



Obrázek 31: Vztah mezi velikostí plochy měřeného objektu a velikostí zorného pole, [1]

Tuto nepřesnost lze vyřešit předřazením IR Fresnelovi čočky před detektor. Tyto čočky jsou potaženy antireflexní vrstvou, jejímž účelem je zamezení odrazu záření. Těchto čoček je na trhu celá řada, liší se především ohniskovou vzdáleností. Právě ohnisková vzdálenost ovlivňuje, na jakou vzdálenost jsme schopni měřit teplotu objektů.

Vliv emisivity

Emisivita je schopnost daného materiálu, z něhož je měřený objekt vyroben, vyzařovat jako dokonalé AČT. Je vyjádřena jako poměr nebo procento výkonu AČT. Velikost emisivity je specifická pro každý materiál, proto je nutno s ní při měření počítat. Emisivita AČT je rovna 1. Je-li emisivita tělesa například 0,95, znamená to, že dochází k odrazu 5% energie. Kromě druhu materiálu je velikost emisivity ovlivněna také vlnovou délkou, [23].

Při konstrukci a programovém řešení IR teploměru není brán vliv emisivity jednotlivých materiálů a je měřeno s hodnotou emisivity 1. Toto považuji za nejdůležitější příčinu nepřesných výsledků v Kapitole 5.1. Řešením tohoto problému by bylo zabudování tlačítka pro nastavení emisivity pro každý druh materiálu. V Tabulce 7 je uvedeno několik příkladů emisivity různých materiálů.

Tabulka 7 : Tabulka emisivit různých materiálů, [5]

Materiál	Emisivita
Sklo	0,92
Beton	0,54
Hliník, leštěný	0,05
Voda	0,98
Led	0,97
Rtuť	0,10
Papír, bílý	0,90
Ocel, zrezivělá	0,69
Ocel, hrubý povrch	0,96
Nátěr se stříbrným povrchem	0,31
Lak, černý, matný	0,97
Lak, černý, lesklý	0,87

ZÁVĚR

Diplomová práce byla dle logických souvislostí rozdělena do několika kapitol, kde bylo pojednáno o fyzikálních vlastnostech záření, metodách měření, rozdělení druhů detektorů a následném praktickém zpracování návrhu a sestrojení bezkontaktního IR teploměru.

Prvním krokem při zpracování diplomové práce bylo nutno prostudovat a pochopit problematiku bezkontaktního měření teploty, metody bezkontaktního měření teploty a také druhy detektorů. K tomuto účelu posloužily četné bibliografické zdroje, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Na závěr lze říci, že na základě zpracované rešerše na téma bezkontaktní měření teploty, návrhu a sestrojení IR bezkontaktního teploměru, který měří teplotu v rozsahu -20 až $+85^{\circ}\text{C}$ přes jeho zhodnocení a navržení možných způsobů řešení, bylo splněno zadání diplomové práce.

LITERAURA

- [1] CHMELAŘ, M., DRASTICH, A., ROZMAN, J. *Lékařská přístrojová technika II.* 1. vyd. Brno 1984.
- [2] *Conrad* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.conrad.fr/ce/fr/product/153005/Photodiode-PIN-400-1100-nm-Osram-Components-BPW-34?ref=list>>.
- [3] DRASTICH, A. *Klasické zobrazovací systémy v medicíně a ekologii – IR zobrazovací systémy.* VUT FEKT UBMÍ. Brno 2009.
- [4] DRASTICH, A. *Zobrazovací systémy v lékařství.* 1. vyd. Brno, 1990. 512 s. ISBN 80 2140 220 2.
- [5] *Emisivita běžných materiálů* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné na: <http://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/syscs/resource/PDF/TechnickaMereni/5_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf>.
- [6] Katalogové a aplikační listy firmy Aimtec [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <<http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/AMSR1-78-NZ.pdf>>.
- [7] Katalogové a aplikační listy firmy Atmel Corporation [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf>.
- [8] Katalogové a aplikační listy firmy Energizer [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <http://data.energizer.com/PDFs/6LR61PL_EU.pdf>.
- [9] Katalogové a aplikační listy firmy Melexis [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.melexis.com/Assets/IR-sensor-thermometer-MLX90614-Datasheet-5152.aspx>>.
- [10] Katalogové a aplikační listy firmy POWERTIP corporation [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <<http://www.vo.gme.cz/dokumentace/513/513-138/dsh.513-138.1.pdf>>.
- [11] Katalogové a aplikační listy firmy Shawo Hwa Industrial Co., Ltd. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <<http://www.vo.gme.cz/dokumentace/758/758-017/dsh.758-017.1.pdf>>.

- [12] Katalogové a aplikační listy firmy Voltcraft [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné na: <http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/100920-an-01-cs-IR_teplomer.pdf>.
- [13] KOBZA, D. *IR teploměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s.
- [14] KREIDL, M. *Meření teploty: Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [15] *Laser shop* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné na: <<http://laser-shop.cz/cs/laser-diody/397-univerzalni-chladic-laserove-diody-to-18.html>>.
- [16] LYSENKO, V. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [17] *MiT* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.mit-laser.cz/index.php?pg=313&ln=cz>>.
- [18] *Omnitron s.r.o.* [online]. 2010-06-22 [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.smartec.cz/intl/cz/infrared.php>>.
- [19] *Protherm* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <http://www.pro-therm.com/images/infrared_basics_figure2.gif>.
- [20] RAJCHL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2011-06-26 [cit. 2014-05-18]. Dostupné na: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>>.
- [21] RIPKA, P., ĎADO, S., KREIDL, M., NOVÁK, J. *Senzory a převodníky*. 1. Vyd. Praha. 2005. 135 s. ISBN 80-01-03123-3.
- [22] ROZMAN, J., SADOVSKÝ, P., ČERMÁK, D. *Diagnostika životního prostředí*. 2. vyd. Brno, 2003. 136 s. ISBN 80-214-1771-4
- [23] SMETANA, J. *Metrologie*. Praha, 2009, č. 3, s. 36-37. ISSN 1210-3543.
- [24] ŠOLC, R. *IR teploměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47 s.
- [25] *Státnice na FI MUNI* [online]. 2013-04-08 [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://statnice.dqd.cz/mgr-szz:in-gra:6-gra>>.
- [26] ŠULC, M. *Česká astronomická společnost* [online]. 2009-12-02 [cit. 2014-05-18]. Dostupná na: <<http://www.astro.cz/clanek/4072>>.
- [27] SZERUDA, R. *Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm>>.
- [28] *Teploměry Galileo* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné na: <<http://www.teplomery-galileo.cz/t-mereni-teploty/>>.
- [29] *Termokamera* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>>.

- [30] VOJÁČEK, A. *Automatizace* [online]. 2005-11-16 [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>>.
- [31] *Wienův posunovací zákon* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>>.
- [32] *Wiring* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné na: <http://wiki.wiring.co/wiki/Main_Page>.

SEZNAM POŽITÝCH ZKRATEK

A/D	Analog na digitál
AC	Alternating Current
AČT	Absolutně černé těleso
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processing
FIR	Finite Impulse Response
FOV	Field of View
FPA	Focal Plane Array
GDN	Ground
IEC	Internatiol Elektrotechnical Commission
IIR	Infinite Impulse Response
IR	Infrared
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting diode
MCU	Multipoint Control Unit
OPN	Oblast prostorového náboje
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SMBus	System Management Bus
USB	Universal Serial Bus
VDD	Voltage Drain
VSS	Voltage Source